

ANÁLISE INCREMENTAL CONSTRUTIVA DE EDIFICAÇÕES

Moacir Kripka

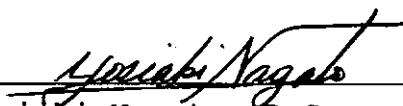
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por



---

Humberto Lima Soriano, D.Sc.  
(presidente)



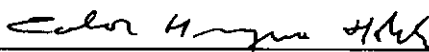
---

Yosiaki Nagato, D.Sc.



---

Ibrahim A.E.M. Shehata, Ph.D.



---

Carlos Henrique Holck, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

NOVEMBRO DE 1990

KRIPKA, MOACIR

Análise Incremental Construtiva de Edificações

[Rio de Janeiro] 1990

X, 129 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,

Engenharia Civil, 1990)

Tese - Universidade Federal do Rio de

Janeiro, COPPE

1. Estruturas      I. COPPE/UFRJ      II. Título  
(série).

À minha família,  
especialmente a meu pai,  
pelo exemplo.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor e amigo Humberto Lima Soriano pelos conhecimentos transmitidos.

Aos demais professores da COPPE, particularmente a Roberto F. de Oliveira, Yosiaki Nagato e Webe J. Mansur.

Aos colegas da COPPE de um modo geral, e em especial aos amigos Luis Paulo, João Paulo, Rafael, Zacarias, Marcílio, Adriana, Jorge ,Elisabeth ,Gray, Bogarin e Sanclér.

Aos funcionários Célio, Beth e Eunice, do Programa de Engenharia Civil da COPPE.

Aos amigos e professores do Sul, que me incentivaram nesta caminhada.

De um modo geral, às pessoas que comigo conviveram durante estes últimos anos. Obrigado a todos.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

*ANÁLISE INCREMENTAL CONSTRUTIVA DE EDIFICAÇÕES*

Moacir Kripka

Novembro de 1990

Orientador: Humberto Lima Soriano

Programa: Engenharia Civil

O objetivo do presente trabalho é estudar a importância da consideração da sequência de carregamento e construção, na análise de edifícios, bem como as formas de melhor simular esta sequência. Com esta finalidade foi desenvolvido um programa de computador, baseado no método dos deslocamentos, que efetua a análise tanto pelo procedimento convencional como pelo procedimento incremental construtivo. Este último permite a obtenção não apenas dos esforços finais como também dos desenvolvidos

durante uma determinada etapa de construção, podendo-se reproduzir os efeitos do processo de escoramento e da construção das alvenarias ou ainda efetuar a pesquisa dos esforços extremos, entre outras facilidades. Através dos exemplos analisados foi possível comprovar que o procedimento convencional de análise conduz a resultados pouco confiáveis, sendo portanto o procedimento incremental indispensável para que se aproxime às reais condições a que as estruturas são submetidas.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.).

*INCREMENTAL CONSTRUCTIVE BUILDING ANALYSIS*

Moacir Kripka

November of 1990

Thesis Supervisor: Humberto Lima Soriano

Department: Civil Engineering

The study of the significance of the consideration of loading and construction sequences in building analysis is the aim of this work. In order to reach this objective a computer program, based on the displacement method, was developed. This program performs the analyses by the conventional procedure and by the incremental constructive procedure. The latter one allows computation of final stresses as well as of the stresses in any construction phase, being possible to model the shoring

process, the masonry construction and the research of the maximum and minimum stresses, among other facilities. The presented numerical examples have shown that the conventional procedure does not give good results, being therefore important to use the incremental constructive procedure to obtain a reliable simulation of the real conditions to which structures are submitted.



ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO II - AÇÕES SOLICITANTES EM EDIFÍCIOS ALTOS	
II.1 - INTRODUÇÃO .....	5
II.2 - CARGAS PERMANENTES .....	6
II.3 - CARGAS ACIDENTAIS .....	7
II.4 - CARGAS DE MONTAGEM .....	8
II.5 - AÇÃO DO VENTO .....	10
II.6 - AÇÃO DE TEMPERATURA .....	13
II.7 - FLUÊNCIA E RETRAÇÃO .....	14
CAPÍTULO III - ANÁLISE INCREMENTAL CONSTRUTIVA	
III.1 - INTRODUÇÃO .....	17
III.2 - CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS .....	24
III.3 - MÉTODOS DE ANÁLISE INCREMENTAL CONSTRUTIVA	28
CAPÍTULO IV - PROGRAMA ACON	
IV.1 - INTRODUÇÃO .....	36
IV.2 - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA .....	38
CAPÍTULO V - EXEMPLOS ANALISADOS	
V.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	49
V.2 - EDIFÍCIO 1 .....	50
V.3 - EDIFÍCIO 2 .....	66
V.4 - EDIFÍCIO 3 .....	90
V.5 - EDIFÍCIO 4 .....	95
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES	
VI.1 - IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE INCREMENTAL .....	107
VI.2 - CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS .....	109

VI.3 - SUGESTÕES PARA FUTURAS IMPLEMENTAÇÕES

COMPUTACIONAIS .....	111
APÊNDICE 1 - MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA <u>ACON</u> .....	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

A análise de estruturas complexas sempre exigiu a consideração de inúmeras hipóteses muito simplificadoras para que se tornasse viável. Posteriormente, com a difusão dos computadores e seu rápido desenvolvimento, passou a ser possível uma análise mais acurada, baseada em critérios que definam de maneira mais realista o comportamento estrutural. No entanto, inexplicavelmente, estes critérios mais realistas não vêm sendo adotados. O objetivo deste trabalho é apresentar um destes critérios, que se refere especificamente às ações atuantes em estruturas de edifícios, mostrando a importância não apenas da correta avaliação destas ações, como também da aplicação das mesmas de forma a simular as reais condições a que a estrutura estará submetida.

A utilização de microcomputadores na análise de edificações acarretou na existência de inúmeros programas com considerável grau de sofisticação. Normalmente, porém, estes programas efetuam a análise supondo que a estrutura só é solicitada após estar totalmente construída. O

presente trabalho, por sua vez, estuda a análise de pórticos de edifício considerando as sequências de construção e de carregamento dos mesmos, tendo por princípio o fato de que muitos dos tipos de carregamento atuantes em edifícios solicitam a estrutura ainda durante a sua construção. Estes tipos de carregamento normalmente são significativos em relação ao carregamento total atuante na estrutura, sendo portanto indispensável sua correta consideração.

Pouco consta na bibliografia conhecida sobre a análise de estruturas de edifício considerando-se as etapas de construção e carregamento. A referência [2] estudou um procedimento de análise incremental construtiva no qual a sequência da análise é inversa à da construção. Este trabalho foi complementado pela referência [3] que, além de aperfeiçoar o resultado da análise, sugeriu a redução do sistema de equações através da condensação estática dos graus de liberdade da estrutura. Já as referências [1] e [6] apresentaram outro procedimento para a simulação do efeito construtivo, sugerindo também uma forma de considerar a ação do escoramento de forma simplificada. A referência [4], além de apresentar o procedimento descrito pelas referências [1] e [6], tentou reproduzir o comportamento incremental construtivo de um pórtico de concreto armado através dos resultados fornecidos pela análise efetuada de modo convencional. Mais recentemente, a referência [5] efetuou a comparação dos dois procedimentos de análise.

No capítulo II do presente trabalho é feito um resumo dos principais tipos de solicitação que devem ser considerados quando da análise de uma estrutura de edifício alto, incluindo uma indicação da etapa da construção na qual esta solicitação se verifica.

No capítulo III é apresentada a análise incremental com as hipóteses básicas adotadas, bem como algumas considerações adicionais incluídas na análise. Além disso, são apresentados também os diferentes procedimentos de análise incremental construtiva, incluindo suas peculiaridades no que se refere à implementação computacional.

O capítulo IV apresenta uma breve descrição do programa desenvolvido neste trabalho. O referido programa foi elaborado na linguagem estruturada FORTRAN 77, sendo feito originalmente em um microcomputador do tipo IBM - PC, podendo porém ser facilmente adaptado a outro tipo de equipamento devido às características da linguagem adotada. Utilizando o método dos deslocamentos, efetua análises tanto pelo procedimento proposto no capítulo anterior como pelo procedimento convencional, podendo fornecer os esforços, deslocamentos e reações durante as etapas intermediárias de construção e de carregamento, pesquisando também as envoltórias dos esforços máximos e mínimos com a indicação da fase em que os mesmos ocorrem, além de possibilitar combinações de carregamentos. Por ser desenvolvido especificamente para a análise de pórticos de

edifícios, a entrada de dados do programa se faz de maneira a reduzir significativamente o volume de informações necessárias, quando se tratar de edificação de geometria semelhante em mais de um andar.

Constam do capítulo V os exemplos analisados e os respectivos resultados, bem como sua interpretação. Foram estudados dois edifícios reais, de 11 e 23 andares, além de duas estruturas fictícias de 4 e 36 andares.

O objetivo do último capítulo é concluir a respeito da importância tanto da análise incremental construtiva como das considerações adicionais referidas no capítulo III. Neste capítulo, destaca-se a grande necessidade da consideração do efeito incremental para que sejam melhor aproximadas as reais condições a que as edificações estarão submetidas não apenas durante a ocupação, como também durante a construção. Mostra-se que a análise pelo procedimento convencional conduz a esforços substancialmente diferentes dos fornecidos pelo procedimento incremental, já que superestima os deslocamentos verticais ocorridos em cada andar da estrutura. Ainda neste capítulo são apresentadas sugestões sobre outras implementações, além das já efetuadas no programa descrito no capítulo IV.

Apesar deste trabalho tratar especificamente de estruturas de edifícios, os conceitos e hipóteses adotados podem ser também aplicados a outros tipos de estrutura.

## CAPÍTULO II

### AÇÕES SOLICITANTES EM EDIFÍCIOS ALTOS

#### II.1 - INTRODUÇÃO

Em edifícios altos, ao contrário das edificações correntes de pequeno porte, existe a necessidade de se considerar uma grande diversidade de ações solicitantes. Além das ações exercidas pelo peso dos materiais constituintes da estrutura e das ações devidas à ocupação (pessoas, peso de móveis, etc.), torna-se importante também a consideração da influência de fenômenos como o vento e a variação da temperatura, entre outros. Diretamente ligada à altura de uma edificação está a necessidade de uma determinação criteriosa de todas as ações que nela atuam, já que a estimativa de forma aproximada da ação em um andar gera uma imprecisão que, quando considerada em vários andares, pode conduzir a erros muito significativos na determinação do carregamento total aplicado à estrutura. Este fato torna interessante também a verificação da influência da maior diversidade possível de fatores que possam de alguma forma gerar solicitações na edificação.

Além da determinação dos tipos de ações atuantes

e de suas respectivas grandezas e posições na estrutura, é importante que se defina quando e de que forma atuam. Os itens seguintes tratam de uma breve descrição das principais ações solicitantes dando especial destaque a esta definição, a qual se torna fundamental na medida em que se parte da consideração de que estas ações não se verificam apenas sobre a estrutura totalmente construída.

## II.2 - CARGAS PERMANENTES

São assim chamadas as cargas devidas ao peso próprio dos elementos que atuam de forma permanente na estrutura. Estes elementos podem ser classificados como estruturais ou não estruturais, sendo normalmente as ações que podem ser definidas de forma mais precisa, além de permanecerem praticamente inalteradas durante toda a existência da edificação.

O carregamento devido aos elementos estruturais é obtido conhecendo-se os pesos específicos dos materiais componentes (fornecidos pelas Normas Técnicas ou por ensaios em laboratório), além das dimensões dos elementos. Devido ao caráter iterativo do dimensionamento dos elementos estruturais, é tolerada uma pequena imprecisão no cálculo do peso próprio dos mesmos. Este tipo de carregamento passa a atuar sobre a estrutura imediatamente a partir de sua colocação na mesma (no caso de elementos pré-moldados) ou de seu lançamento (elementos moldados "in loco").



Os carregamentos devidos a elementos não estruturais considerados como atuando de forma permanente na edificação são provenientes do peso próprio de alvenarias, divisórias fixas, revestimentos internos e externos, canalizações, etc. A exemplo dos elementos estruturais, podem ter seu peso específico definido pelas Normas Técnicas ou por ensaios apropriados. Os carregamentos de peso próprio devidos a elementos não estruturais normalmente são aplicados na estrutura ainda durante a sua construção.

As cargas permanentes respondem pela maior parte do carregamento vertical total atuante em edificações de uso residencial ou comercial, principalmente quando se trata de estruturas de concreto armado. Em edifícios altos, nos quais os elementos estruturais assumem grandes proporções, as cargas permanentes ganham particular relevância, podendo superar 80 % do carregamento vertical total.

### II.3 - CARGAS ACIDENTAIS

As cargas acidentais, que são basicamente gravitacionais, são resultantes das ações humanas e do peso de móveis e utensílios, e têm sua magnitude estabelecida de acordo com o tipo de utilização a que se destina a edificação ou parte dela. Estas cargas, apesar de seu caráter basicamente dinâmico, são comumente analisadas como

cargas estáticas.

As cargas acidentais são de difícil determinação, e por isso são fornecidos pelas Normas Técnicas valores estatísticos para os carregamentos mais comuns em estruturas de edifícios. Estes carregamentos são supostos uniformemente distribuídos ou concentrados e, mesmo contendo fatores de segurança bastante elevados, representam apenas uma pequena parcela do carregamento vertical total, apesar das cargas acidentais de ocupação representarem a finalidade única da edificação.

#### II.4 - CARGAS DE MONTAGEM

As cargas de montagem podem ser devidas ao trânsito de operários, à estocagem de materiais de construção, às imperfeições nas peças estruturais pré-moldadas, ou à forma de construção adotada, entre outros. Estas cargas devem ser sempre cuidadosamente estimadas, sob pena de se estar desprezando efeitos de significativa importância. As cargas de montagem, por atuarem durante a construção, tornam essa estimativa bastante difícil quando efetuada a análise convencional, na qual se considera que todos os carregamentos passam a atuar somente sobre a estrutura completa.

Em edificações de concreto armado, normalmente são usadas escoras para que os andares recém concretados sejam suportados pelos andares inferiores. Se não for

tomado especial cuidado durante as fases de construção, as cargas a serem suportadas pelos andares que estão servindo de apoio provavelmente superarão as cargas de projeto. Este problema agrava-se quando a carga acidental é pequena em relação ao peso próprio. As referências [12], [13] e [14] estudaram modelos computacionais que simulassem a influência do carregamento do andar escorado nos demais andares, procurando distribuir este carregamento de forma a minimizar sua influência ou, caso seja necessário, indicando o carregamento a utilizar para um novo dimensionamento.

O modelo de análise incremental construtivo permite que se obtenha os esforços máximos em cada elemento da estrutura através da simulação do escoramento pela transferência do carregamento de um andar para um grupo de andares imediatamente inferiores. O tamanho deste grupo dependerá basicamente da velocidade de construção, já que, no caso de estruturas de concreto armado, os elementos recém concretados ainda não possuem a resistência para a qual foram projetados. As cargas a serem consideradas podem ser classificadas como: carga de peso próprio da laje, carga acidental de sustentação (peso de formas e escoras) e carga acidental extraordinária (peso do maquinário e ação de operários). Chamando de  $g$  o peso por unidade de área da laje recém concretada, a referência [13] assume uma distribuição normal para a carga de peso próprio e para a carga acidental de sustentação, e uma distribuição de forma exponencial para a carga acidental extraordinária, com

valores médios para as duas últimas de 0,1g e 0,5g, respectivamente.

A deformação inicial em algum membro da estrutura é também uma carga de montagem. Esta deformação pode ocorrer, por exemplo, devido à fabricação de um elemento de viga com um comprimento maior ou menor que o comprimento teórico, ou de uma coluna com curvatura inicial não prevista. Uma deformação inicial pode gerar tensões que, apesar de atuarem também após a construção da estrutura (ao contrário das tensões decorrentes de cargas de montagem anteriormente citadas), serão corretamente computadas somente se considerado seu caráter construtivo, já que o aparecimento destas tensões se dará tão logo o membro que as gere seja adicionado à estrutura.

A grande diversidade de sistemas estruturais e de métodos construtivos utilizados exige que cada edificação seja analisada de modo particular em relação às solicitações a que pode estar submetida durante as etapas de construção. Apesar de sua relativa complexidade, este tipo de análise deverá sempre que possível ser efetuado.

## II.5 - AÇÃO DO VENTO

A definição de edifício alto está intimamente ligada ao efeito causado pelo vento. Genericamente, designa-se por edifício alto toda edificação na qual os esforços gerados pelas cargas laterais são significativos

em relação aos esforços gerados pelo carregamento vertical. A consideração dos efeitos causados pela ação do vento será então fundamental, sendo que em função destes efeitos é que se dará a escolha do sistema estrutural mais adequado.

A ação do vento, por ser um fenômeno natural, é determinada para fins de análise com base em critérios bastante genéricos, e por isso necessita para sua determinação de estudos específicos quando a edificação tiver formas ou dimensões fora das habituais.

A Norma Brasileira para a determinação das forças devidas ao vento em edificações (referências [17] e [18]) parte do conceito de velocidade característica para a determinação das forças a considerar na análise. A velocidade característica do vento,  $V_k$ , para uma dada edificação, é expressa por

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3, \quad (\text{eq. II.1})$$

onde  $V_0$  é a velocidade básica do vento, que é função apenas do local onde a estrutura será construída, e representa a máxima velocidade média medida sobre 3 segundos, e que pode ser excedida em média uma vez a cada 50 anos, a 10 metros sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano;  $S_1$  é um fator que leva em consideração as grandes variações locais na superfície do terreno;  $S_2$  é um fator que corrige a

velocidade básica do vento em função da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação e da variação da velocidade do vento com a altura acima do nível do terreno; o fator  $S_3$ , por sua vez, considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação, baseado em fatores estatísticos.

Conhecida a velocidade característica calcula-se a pressão dinâmica  $q$ , sendo

$$q = V_k^2 / 1,6, \text{ em unidades do SI} \quad (\text{eq.II.2})$$

ou

$$q = V_k^2 / 16, \text{ em unidades técnicas} \quad (\text{eq.II.3})$$

A força exercida na direção do vento, ou força de arrasto,  $F_a$ , pode então ser obtida por

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_e, \quad (\text{eq. II.4})$$

onde  $C_a$  é o coeficiente de arrasto (função da relação entre as dimensões da estrutura e da altura das edificações vizinhas) e  $A_e$  é a área efetiva, que é a área da projeção ortogonal da edificação sobre um plano perpendicular à direção do vento.

A força do vento, como se observou, é calculada a partir de uma velocidade que pode ser excedida em média uma vez a cada 50 anos. Portanto, apesar do vento atuar sobre a estrutura desde o início da construção, a probabilidade de que seu efeito seja muito significativo durante as etapas de construção é bastante reduzida, de modo que a não consideração do mesmo durante estas etapas parece ser um procedimento bastante aceitável. A própria Norma Brasileira sugere uma redução em 17% do fator estatístico  $S_z$  para o cálculo do efeito do vento em estruturas parcialmente executadas, o que representa uma redução de mais de 31% no valor da pressão dinâmica. Como a força a aplicar está diretamente relacionada com a altura da edificação, esta força sofreria substancial redução em seu valor para uma etapa intermediária qualquer também devido a este fato. Portanto, para que a força devida ao vento pudesse ser corretamente considerada para as etapas de construção, seu valor deveria ser recalculado para cada etapa em cada um dos andares já construídos, o que implicaria em um considerável trabalho adicional para o projetista, além do grau de incerteza envolvido em tal procedimento.

## II.6 - AÇÃO DE TEMPERATURA

A resposta de um elemento estrutural a mudanças de temperatura depende basicamente das condições de contorno deste elemento. Sem restrições à deformação, o mesmo apresentará uma mudança em seu comprimento ou em sua curvatura, proporcionais à temperatura ou ao gradiente de

temperatura, respectivamente, além de proporcionais ao coeficiente de condutibilidade térmica. Caso a deformação do elemento seja de alguma forma impedida, serão desenvolvidas tensões em função da ação da temperatura sobre o mesmo.

Os efeitos causados pela temperatura nos elementos estruturais podem ser bastante reduzidos pelo controle da exposição destes elementos ou pela diminuição de suas restrições às deformações. Além da análise em relação aos elementos estruturais, os elementos não estruturais como alvenarias, canalizações e revestimentos também merecem especial atenção, já que podem ser bastante afetados pelos movimentos ocorridos na estrutura.

As variações de temperatura podem ser devidas a fatores naturais ou artificiais, sendo que os primeiros atuam durante toda a vida da edificação, além de ser impossível sua correta determinação.

## II.7 - FLUÊNCIA E RETRAÇÃO

Quando da análise de edifícios altos, seria importante que se considerasse também fenômenos como a fluência e a retração, que atuam durante um período de tempo bastante grande e podem ser responsáveis por grandes deformações na estrutura. Estas deformações na maior parte das vezes são irreversíveis.

A retração, característica das estruturas de



concreto armado, consiste na diminuição das dimensões dos elementos estruturais devido à lenta evaporação da água não consumida quando da reação química de endurecimento do concreto. A magnitude desta diminuição depende fundamentalmente das dimensões relativas dos membros (um elemento de grande volume em relação à sua superfície vai sofrer uma retração mais gradual em relação a um elemento com pequena relação volume-superfície) e da taxa de armadura dos mesmos (a armadura tende a restringir a retração do concreto).

Apesar de, como citado, verificar-se durante um grande período de tempo, a retração inicia em um elemento tão logo comece o seu processo de endurecimento, assumindo rapidamente valores bastante significativos e tendendo a uma estabilização nas dimensões do elemento, a qual efetivamente se dará somente após muitos anos.

Ao contrário da retração, que independe do carregamento, a fluência decorre unicamente deste. As deformações devidas à fluência dependem porém de vários fatores, como a resistência do concreto, a idade em que o mesmo é carregado, as dimensões do elemento e a taxa de armadura.

Pelo fato das deformações devidas à fluência no concreto variarem de acordo com a idade do carregamento, o cálculo correto destas deformações só será efetuado por intermédio de uma análise incremental, através da qual se

poderá considerar o fato de algumas colunas só serem plenamente carregadas após muitos meses da sua construção. Esta consideração, aliada ao fato de que as colunas inferiores de uma edificação possuem uma taxa de armadura próxima da máxima admissível, faz com que as colunas situadas na altura média da edificação sejam as mais deformadas devido ao fenômeno da fluência.

## CAPÍTULO III

### ANÁLISE INCREMENTAL CONSTRUTIVA

#### III.1 - INTRODUÇÃO

Na análise de edifícios parte-se do princípio segundo o qual os diversos carregamentos são aplicados simultaneamente na estrutura pronta, o que certamente não é correto, pois a estrutura vai sendo solicitada à medida em que é construída. Sabe-se que apenas a carga accidental de ocupação atua somente na estrutura pronta, sendo que este carregamento não é o preponderante em edifícios. As demais ações, por serem relevantes em relação ao carregamento global, serão então responsáveis por grandes distorções nos esforços desenvolvidos na estrutura, caso seu modo de atuação não seja corretamente considerado na análise, como se propõe no presente trabalho.

Considere-se a princípio uma estrutura de concreto armado, tomando-se apenas o carregamento de peso próprio. Sabe-se que os deslocamentos devidos a este carregamento, no andar correspondente, ocorrerão apenas no momento da retirada do escoramento (desconsiderando-se solicitações devidas a outros fatores como fluência e

variação de temperatura). Um determinado andar será construído, portanto, sem que tenha sido submetido a qualquer tipo de tensão proveniente de deslocamentos do andar que lhe é imediatamente inferior (para fins de análise, designa-se por andar o plano formado por lajes e vigas, além dos pilares contidos entre este plano e o situado logo abaixo). A consideração de que os deslocamentos devidos ao peso próprio já ocorreram em um determinado andar equivale a, na análise seguinte, considerá-lo como sem peso. Percebe-se que, obviamente, o referido andar será influenciado somente pelos carregamentos aplicados à estrutura após a sua construção e a retirada de seu escoramento. Por consequência, tem-se que o peso próprio de um andar não pode gerar tensões em um andar superior a este, e que portanto ainda não existe.

Os deslocamentos computados de acordo com o procedimento descrito são relacionados a um referencial local variável, situado sempre de modo a só considerar o deslocamento de um andar após a construção e carregamento do mesmo. Já o procedimento convencional de análise acumula os deslocamentos dos nós da estrutura em relação a um referencial global fixo, e portanto calcula seus deslocamentos desde a posição no espaço inicialmente prevista para sua construção até a posição final, já com a estrutura totalmente construída. Observa-se que, desta forma, estão sendo erroneamente computados em alguns andares deslocamentos que não são responsáveis por quaisquer deformações nestes andares.

Quando efetuada a análise de edificações de pequena altura, é prática corrente que os elementos sejam considerados de forma isolada, desprezando-se em parte a interação entre os mesmos. Assim, as vigas são analisadas supondo-se a indeslocabilidade de seus apoios, utilizando-se as reações resultantes para o cálculo dos esforços desenvolvidos nos pilares sobre os quais a viga se apoia. De acordo com este procedimento, os deslocamentos e deformações de cada um desses pilares não influem nem no comportamento dos pilares adjacentes nem no das vigas que os unem (já que a análise é desenvolvida unidirecionalmente, e de cima para baixo). Este tipo de análise tem caráter por demais aproximativo, justificando-se porém a sua utilização para edificações de poucos andares, dada a significativa simplificação que introduz no cálculo dos esforços.

Em edifícios altos, o deslocamento diferencial vertical entre pilares adjacentes ganha maior importância, pois alguns elementos são dimensionados principalmente em função do carregamento lateral e não do vertical, como por exemplo caixas de escadas ou poços de elevadores, ou ainda pilares extremos de pórticos, já que estes últimos têm grande influência na inércia total da estrutura em relação às ações horizontais. Os elementos dimensionados predominantemente em função destas ações estão sujeitos a uma tensão normal bem inferior à dos demais, quando sob a ação do carregamento vertical. A deformação diferencial

axial entre elementos vizinhos, ao atingir valores significativos, gera uma redistribuição de esforços normais nos pilares, além de grandes esforços cisalhantes e flexionantes nas vigas que unem estes pilares.

Na figura (III.1) apresenta-se o comportamento de uma viga sobre a qual é aplicado um carregamento uniformemente distribuído, sujeita a um deslocamento vertical  $d_v$  em uma de suas extremidades. Verifica-se que este deslocamento diferencial será responsável pelo aparecimento de esforços de sinais opostos nas duas extremidades do elemento, acarretando em um aumento dos esforços totais em um dos extremos, acompanhado de igual redução no extremo oposto. Dependendo da magnitude do deslocamento, os esforços decorrentes do mesmo podem inclusive ser invertidos em relação aos esforços que apareceriam quando da não consideração deste deslocamento.

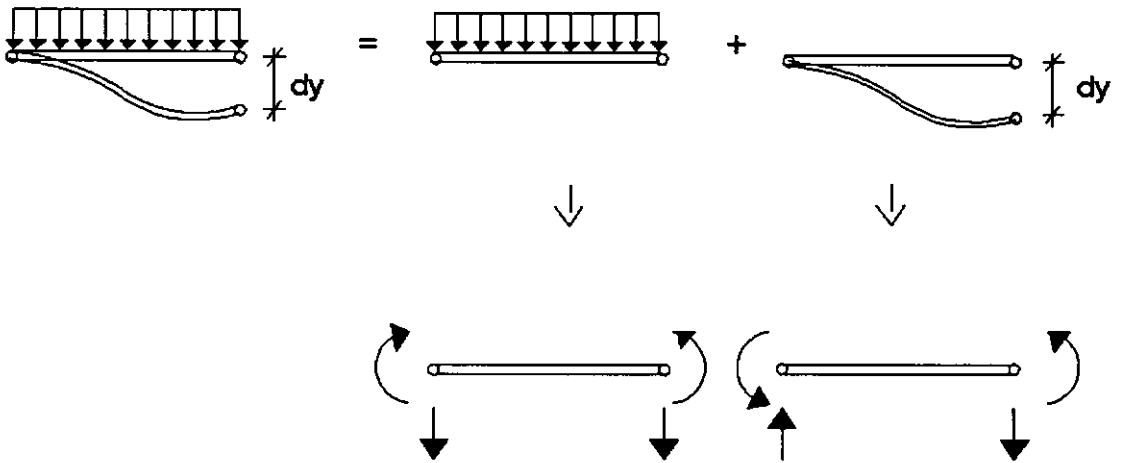


Figura III.1 - Influência do deslocamento diferencial

Verificada a importância da consideração dos deslocamentos diferenciais no cálculo dos esforços finais desenvolvidos em estruturas de edifícios, fica evidente a necessidade da correta determinação destes deslocamentos. Abstraindo-se do efeito do escoramento, a figura (III.2) apresenta um esquema para comparação entre o enfoque convencional de análise e o enfoque incremental. É importante lembrar que por tratar-se de uma análise linear é válido o princípio da superposição dos efeitos. Considere-se a análise do pórtico isolado representado na figura (III.2a), sujeito ao carregamento de peso próprio definido em (III.2b), onde  $\gamma_m$  é o peso específico do

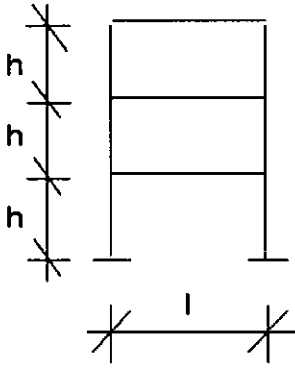
material e  $A_p$  e  $A_v$  as áreas das seções transversais. Partindo da equação de equilíbrio do método dos deslocamentos

$$\underline{K} \cdot \underline{U} = \underline{P} \quad (\text{eq. III.1})$$

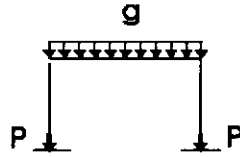
onde  $\underline{K}$  é a matriz de rigidez da estrutura,  $\underline{U}$  é o vetor de deslocamentos nodais e  $\underline{P}$  é o vetor das cargas nodais equivalentes às cargas externas aplicadas à estrutura, tem-se que o vetor  $\underline{U}$  pode ser obtido através de uma única análise, desde que se considere a estrutura totalmente construída como em (III.2c) e portanto a rigidez da estrutura não varie de uma para outra etapa de carregamento. Devido à proporcionalidade entre força e deslocamento, as ações podem ser acumuladas em um único vetor. Já no procedimento incremental, indicado em (III.2d), a rigidez da parte ainda não construída da estrutura deve ser obrigatoriamente desconsiderada e, como consequência, o número de análises a efetuar deve em princípio ser igual ao número de andares da estrutura. Em cada uma destas análises, devido à variação na rigidez da estrutura, as dimensões da matriz de rigidez  $\underline{K}$  também variam, obtendo-se pela resolução do sistema um vetor de deslocamentos  $\underline{U}$  de mesmo comprimento que uma das dimensões da matriz  $\underline{K}$ , e portanto também variável a cada análise. De posse destes deslocamentos, determinam-se os esforços desenvolvidos na estrutura em cada etapa. Para a obtenção



dos esforços a que cada elemento da estrutura foi submetido desde a primeira etapa de análise, basta que se efetue a superposição destes esforços.



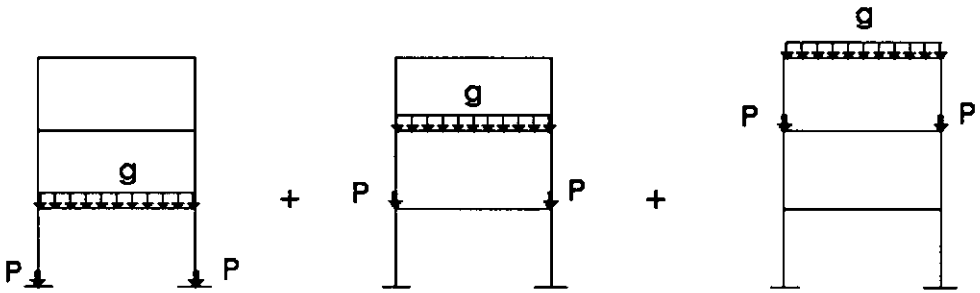
(III.2a)



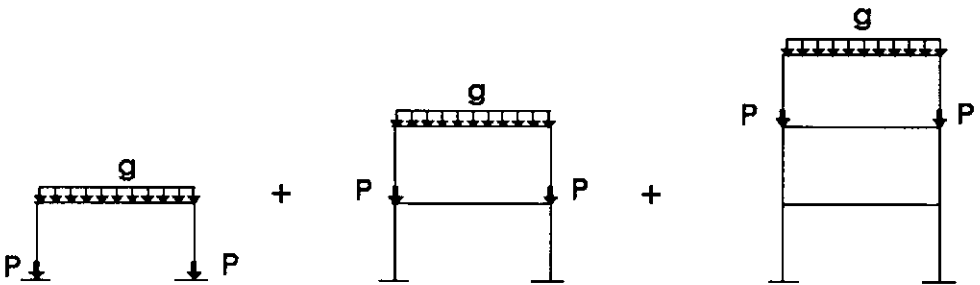
(III.2b)

$$P = \gamma_m \times A_p \times h$$

$$g = \gamma_m \times A_v$$



(III.2c)



(III.2d)

Figura III.2 - Comparação entre o procedimento convencional de análise e o proposto

### III.2 - CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

Os carregamentos considerados como tendo caráter construtivo e que portanto devem ser supostos aplicados gradualmente à estrutura (de acordo com o procedimento proposto) são, além do peso próprio dos elementos estruturais, o peso de alvenarias, revestimentos, divisórias fixas e esquadrias (tanto os contidos no plano do pórtico como os fora deste). Estes carregamentos permanentes, excetuando o de peso próprio, não ocorrem em concomitância com a retirada do escoramento, e sim com uma certa defasagem. O número de estágios de carregamento na estrutura é aumentado então desta diferença, podendo porém o número de análises a efetuar continuar igual ao número de andares, desde que se somem as ações para cada estágio de rigidez da estrutura.

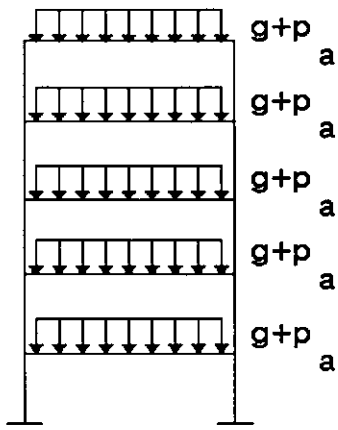
Outra consideração possível é a das cargas de montagem. Como mencionado anteriormente, estas cargas podem ser devidas ao escoramento, ao trânsito de operários, à estocagem de materiais, etc. Tais cargas variam muito em função do sistema de escoramento utilizado, bem como de acordo com o cronograma de colocação e retirada deste escoramento. Conhecendo-se o cronograma a ser utilizado, a inclusão da consideração do escoramento na análise reproduzirá com maior precisão a situação real de carregamento da estrutura. Com o conhecimento do sistema de escoramento a ser adotado pode-se, inclusive, simular uma situação crítica de carregamento, como prevenção para um

possível descaso do construtor com relação à distribuição deste carregamento.

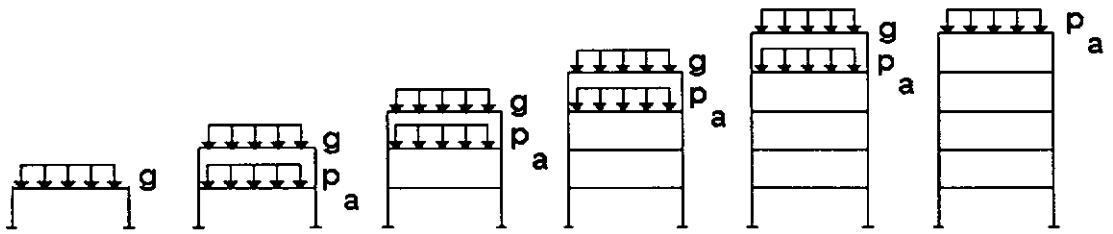
Uma grande possibilidade aberta pela análise construtiva é a da pesquisa dos esforços extremos. As solicitações a que os elementos estruturais são submetidos durante as etapas de construção podem às vezes superar as solicitações a que estes mesmos elementos estarão submetidos quando da estrutura totalmente construída e carregada. Por outro lado, os mesmos elementos podem ter seus esforços invertidos em relação aos finais, sem que tenham sido dimensionados para resistirem a tais esforços (caso se efetuasse a análise clássica). De posse da história dos carregamentos, pode-se então obter as envoltórias máxima e mínima dos esforços no conjunto dos elementos estruturais.

O procedimento incremental de análise pode, de acordo com o porte ou complexidade da estrutura a analisar, exigir, além de grande quantidade de memória auxiliar de computador, um longo tempo de processamento. Uma alternativa para contornar estes inconvenientes pode ser a análise de um grupo de estágios de carregamento simultaneamente, ao invés da análise de um estágio de cada vez, como inicialmente proposto. À medida em que o tamanho de cada grupo aumenta, porém, o comportamento da estrutura analisada tende a afastar-se do comportamento real, até atingir a situação limite em que o tamanho do grupo seja igual ao número máximo de análises, e com isso a análise a

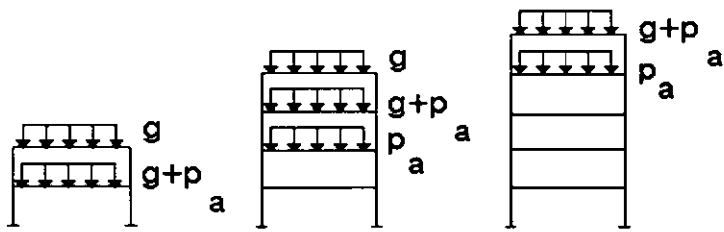
efetuar seja idêntica à análise convencional. Uma exceção a esta relação entre grau de aproximação e tamanho do grupo pode ser a construção em estrutura de aço, na qual os pilares de dois ou mais andares podem ser montados com uma única peça, tendo-se então que o comportamento real seria adequadamente simulado pela análise simultânea destes andares atingidos pela etapa de construção. A figura (III.3) ilustra, para um pórtico isolado de uma edificação de 5 andares, como poderia ser efetuada a análise incremental construtiva da forma acima descrita. Considere-se para isto o carregamento total a aplicar ao nível de cada pavimento como  $g + p_a$ , onde  $g$  representa o peso próprio das vigas e  $p_a$  o peso das alvenarias. É desprezado o efeito do escoramento, e a carga de alvenaria é aplicada com defasagem de um andar em relação à carga de peso próprio das vigas. Para as condições de carregamento acima descritas e ilustradas em (III.3.a), tem-se em (III.3.b) as estruturas a analisar para grupos de tamanho igual a um estágio de carregamento. Em (III.3.c) e (III.3.d) o procedimento incremental de análise é aplicada para grupos contendo dois e três estágios cada um, respectivamente.



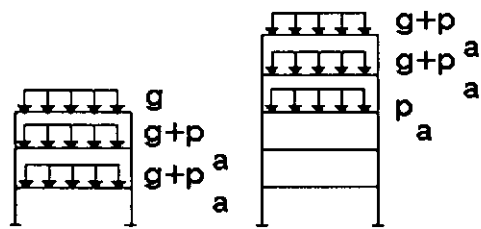
(III.3a)



(III.3b)



(III.3c)



(III.3d)

Figura III.3 - Análise por grupos de estágios

Como mencionado anteriormente, os deslocamentos utilizados para fins de cálculo de tensões são obtidos em relação a um referencial local de cada andar da edificação. Os deslocamentos devem porém ser obtidos também em relação ao referencial global para que através destes deslocamentos possa ser feito o nivelamento dos pisos, fundamental em edificações de grande altura. Os deslocamentos globais, ou absolutos, podem facilmente ser calculados, a partir dos deslocamentos já obtidos nos referenciais locais, com a utilização da equação

$$d_{abs_i} = d_i^n + \sum_{j=1}^{i-1} D_j \quad , \quad (eq. III.2)$$

onde  $n$  é o número total de andares. O deslocamento  $D$  refere-se ao valor parcial, ou seja, o obtido antes da superposição, enquanto  $d$  representa o deslocamento final.

### III.3 - MÉTODOS DE ANÁLISE INCREMENTAL CONSTRUTIVA

Constam da literatura dois procedimentos básicos para a simulação do efeito construtivo em edifícios. Ambos apresentam resultados idênticos, porém possuindo cada um certas peculiaridades que, dependendo do caso, podem apresentar alguma vantagem sobre o outro método sob o

aspecto computacional.

O primeiro procedimento, apresentado nas referências [1] e [6], trata-se de um processo sequencial direto, em que a sequência das análises acompanha as sequências de construção e de carregamento. Neste procedimento as  $n$  análises são efetuadas sempre com a estrutura construída até o  $i$ -ésimo andar, sendo que  $i$  varia de 1 até o número total de andares, e o carregamento de peso próprio é aplicado apenas neste andar. Os deslocamentos assim obtidos são somados aos das demais análises em que o andar  $i$  já aparece, isto é, nas análises de  $i$  a  $n$ . Segue-se idêntico procedimento para os esforços.

O segundo procedimento, descrito nas referências [2] e [3], consiste num processo sequencial inverso, ou seja, a sequência das análises é inversa às de construção e carregamento da estrutura. Esse artifício faz com que a influência de um carregamento de peso próprio possa ser computada através de suas reações, no pavimento imediatamente inferior. Logo, ao efetuar-se a análise do andar  $i$ , aplica-se a este andar não apenas o seu peso próprio, como também as ações dos carregamentos de peso próprio dos andares superiores (que nada mais são que os esforços de extremidade, com sinais trocados, dos elementos do andar  $i+1$  na interface entre este andar e o andar  $i$ ). Esse procedimento torna dispensável a superposição tanto dos deslocamentos como dos esforços, que são os definitivos para o andar em análise.

Considere-se inicialmente o pórtico da figura (III.2a), tendo como carregamento aplicado apenas o peso próprio, representado em (III.2b). Têm-se ilustrados na figura (III.4) os dois procedimentos acima descritos.

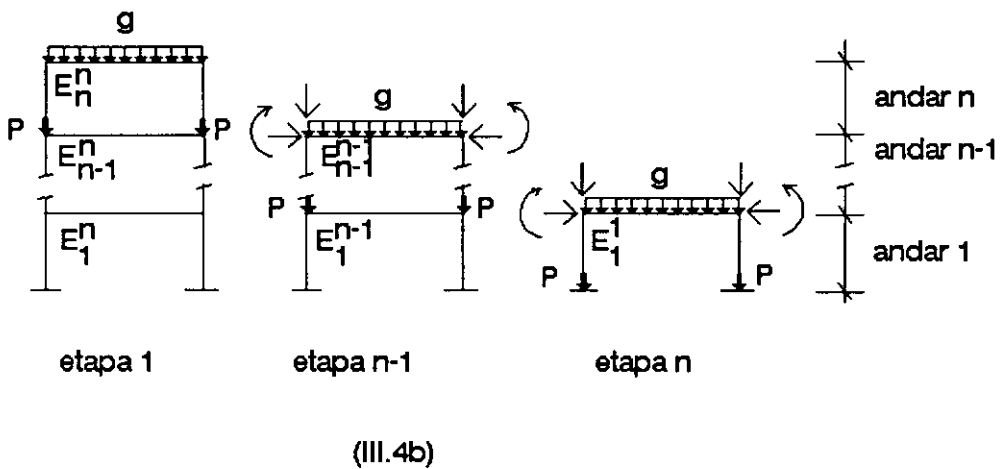
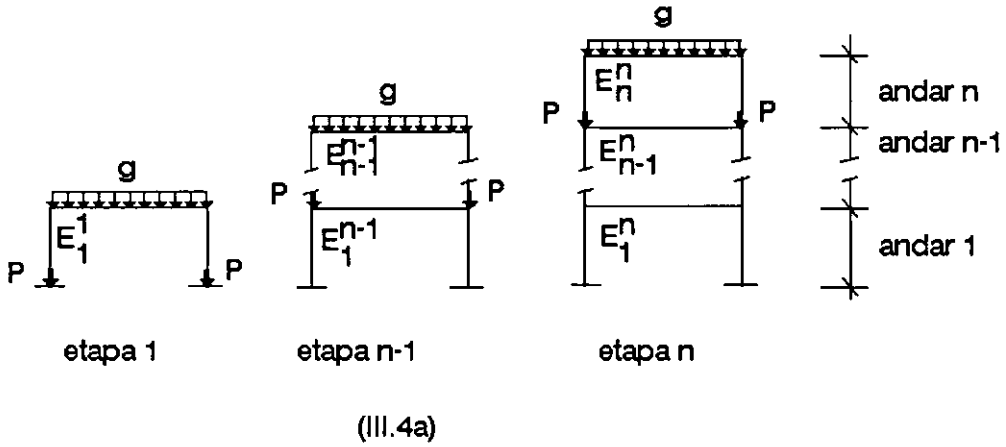


Figura III.4 - Procedimentos de análise incremental

Vale ressaltar que o processo chamado sequencial direto também poderia ter sua ordem invertida, já que nele



as etapas de análise são independentes entre si. Aqui foi mantida a sequência de construção apenas visando maior clareza de exposição.

Ao considerar na análise do  $i$ -ésimo andar que as cargas estão aplicadas apenas neste andar, tem-se que, no processo sequencial direto, os esforços e deslocamentos no andar  $i$ , após a edificação atingir  $m$  andares, são fornecidos pelas equações

$$e_i^m = \sum_{j=1}^m E_i^j \quad (\text{eq. III.3a})$$

$$d_i^m = \sum_{j=1}^m D_i^j, \quad (\text{eq. III.3b})$$

para  $m \geq i$ .

Nestas equações, os esforços e deslocamentos obtidos em cada etapa da análise são designados por  $E$  e  $D$ , respectivamente, enquanto os esforços e deslocamentos finais para o andar  $m$  são designados por letras minúsculas.

Já para o processo sequencial inverso, a não necessidade de superposição dos efeitos implica que

$$e_1^i = E_1^i \quad (\text{eq. III.4a})$$

$$d_1^i = D_1^i \quad (\text{eq. III.4b})$$

Os esforços e deslocamentos parciais para a etapa de construção  $m$ , por sua vez, são obtidos das equações

$$e_1^m = e_1^i - E_1^{m+1} = E_1^i - E_1^{m+1} \quad (\text{eq. III.5a})$$

$$d_1^m = d_1^i - D_1^{m+1} = D_1^i - D_1^{m+1}, \quad (\text{eq. III.5b})$$

para  $i \leq m < n$ .

Quando no processo inverso as cargas forem aplicadas apenas no andar a analisar e não se desejar o cálculo dos esforços intermediários, pode ser feita a condensação estática dos graus de liberdade de parte da estrutura, resultando sempre em um pequeno número de equações a solucionar. Para isso, a partir do segundo andar e seguindo a sequência de construção, monta-se a matriz de rigidez da parte da estrutura relativa aos elementos do andar  $(i-1)$  e condensa-se estaticamente os graus de liberdade deste andar, obtendo-se então os apoios elásticos para o  $i$ -ésimo andar, assim procedendo até o andar  $(n-1)$ .

Segue a análise no sentido inverso conforme descrição anterior, porém analisando-se cada andar como sobre apoios elásticos devidos aos andares inferiores. Este procedimento de condensação estática deixaria de ser vantajoso caso se desejasse os esforços e os deslocamentos intermediários, pois só fornece os resultados para o andar  $i$ , que pelo processo inverso são os resultados finais.

O processo sequencial direto é sempre baseado num mesmo procedimento, independente do número de carregamentos ou da natureza dos mesmos. O atendimento às equações (III.3) mostra-se como condição suficiente para a utilização deste processo, e o número máximo de análises a efetuar será igual ao número de andares da edificação (somado de uma eventual defasagem).

O processo sequencial inverso, dependendo das considerações feitas, necessita uma abordagem específica. Tome-se como exemplo a aplicação de outro tipo de carregamento, além do peso próprio dos elementos estruturais. O levantamento das alvenarias e o revestimento dos elementos, por exemplo, são feitos em andares que não estão mais escorados. Considere-se estes carregamentos atuando com uma defasagem de dois andares, ilustrados na figura (III.5). Nesta figura,  $g_j$  representa as cargas de peso próprio dos elementos estruturais do  $j$ -ésimo andar, e  $p_a$  representa as cargas devidas ao peso das alvenarias e dos revestimentos atuando simultaneamente. Desse modo, quando apresenta sentido contrário ao da gravidade,  $g_j$

simula o alívio ocorrido no andar  $(j-1)$  devido à retirada do escoramento do andar  $j$ , que sobrecarregava o andar  $(j-1)$  na análise anterior. O fato de mais de um tipo de carregamento estar atuando, e com diferentes andares sendo carregados simultaneamente, faz com que a análise pelo processo inverso não possa mais ser levada a efeito com a simples utilização das equações (III.4) e (III.5), já que nas ações aplicadas ao andar a ser analisado, relativas aos andares superiores, estão embutidas as ações do carregamento a ser aplicado com defasagem, e que portanto ainda não deveriam atuar. Para que estas ações indevidamente consideradas possam ser conhecidas e eliminadas, deve-se analisar separadamente cada carregamento que atue em defasagem. Assim, tem-se um sistema de equações com tantos vetores independentes quantos forem esses carregamentos. Além do mais, a condensação estática dos graus de liberdade, que seria a grande simplificação que influenciaria a escolha do processo a utilizar na análise, já não é feita da forma simples descrita anteriormente.

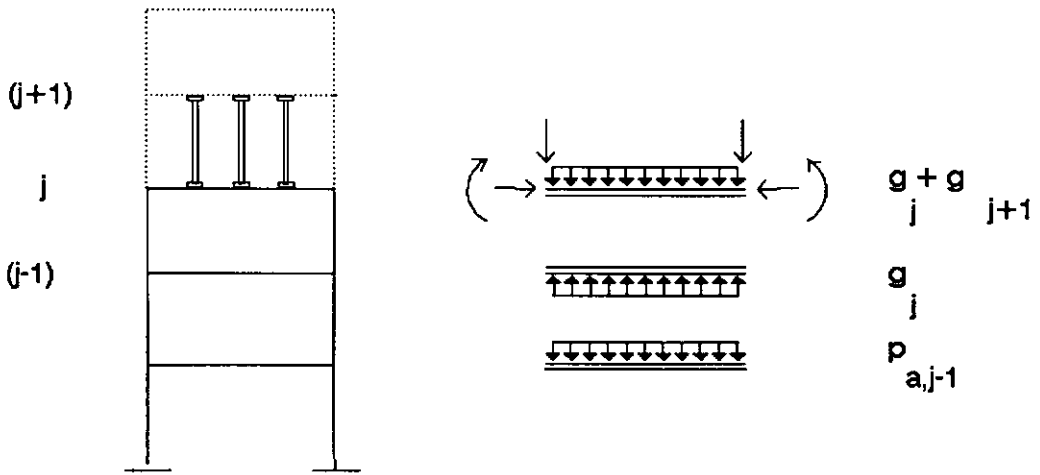


Figura III.5 - Processo sequencial inverso

A situação de carregamento acima referida torna o procedimento sequencial inverso menos indicado que o sequencial direto, a menos que se deseje um resultado de caráter mais aproximativo, ou seja, considerando-se que todos os carregamentos incrementais atuam ao mesmo tempo.

Vale repetir que quando aplicados de forma plena, ambos os procedimentos de análise incremental se equivalem, fornecendo resultados idênticos, a menos dos erros inerentes à aritmética em ponto flutuante dos computadores digitais.

## CAPÍTULO IV

### PROGRAMA ACON

#### IV.1 - INTRODUÇÃO

Para a análise de pórticos planos de edifícios considerando as sequências de construção e carregamento, foi desenvolvido o programa ACON, que faz uso do método dos deslocamentos, e que teve por base um programa para a análise convencional de pórticos planos genéricos, desenvolvido de acordo com a referência [7]. O programa utiliza a técnica do número grande para a imposição das condições geométricas de contorno, sendo o sistema solucionado pelo método de Cholesky. O programa ACON foi criado na linguagem estruturada FORTRAN 77, em um microcomputador do tipo IBM-PC. Foi utilizada a técnica de "Overlay" (mantém na memória principal apenas a parte do programa que está sendo utilizada), o que permite um maior dimensionamento das matrizes para uma mesma quantidade de memória. Com isso o programa foi inicialmente dimensionado para analisar estruturas de até 250 nós, 300 elementos e 40 andares, o que certamente cobre a grande maioria dos pórticos de edifícios construídos no país. Por ser, como mencionado, um programa específico para edifícios, sua

entrada de dados é feita de modo a tirar partido de uma característica comum à maior parte dos prédios de uso comercial ou residencial, que é a repetição de uma mesma geometria (e/ou carregamento) em vários andares. Assim, na definição dos dados de entrada, descrevem-se as características de um tipo de andar, indicando em quais andares elas se repetem, diminuindo consideravelmente o volume de dados.

O programa desenvolvido permite que se faça a análise tanto pelo procedimento incremental como pelo procedimento convencional, bem como a combinação de vários casos de carregamento. Foi utilizado para a análise incremental o procedimento sequencial direto, já que se procurou incluir nesta análise todas as considerações descritas no capítulo anterior, as quais podem ser feitas pelo processo escolhido de maneira menos complexa.

Como citado anteriormente, o procedimento sequencial direto, por ter suas diversas etapas de análise realizadas de forma independente entre si, pode ter a sequência destas etapas invertida. No presente programa esta inversão foi efetivamente feita, o que simplificou consideravelmente a análise global, dadas as características do programa original utilizado como base para o desenvolvimento do programa ACON.

As ações podem ser aplicadas tanto nos nós como nos elementos, sendo que nestes últimos as cargas podem ser

concentradas, uniformemente distribuídas (aplicadas em parte do vão ou em todo ele) ou ainda cargas térmicas (com variação uniforme de temperatura ao longo do eixo ou variação uniforme ao longo da seção transversal). Outras ações podem ser impostas à estrutura na forma de recalques de apoio ou apoios elásticos.

O referido programa, além das opções citadas, permite que se faça outras considerações de análise, como por exemplo: a computação de forma automática do peso próprio dos elementos estruturais contidos no plano do pórtico; a simulação de nós finitos (fundamental em edifícios altos, onde se encontram colunas de grande seção transversal); ou ainda a deformação dos elementos devido ao esforço cortante.

Todos os arquivos temporários utilizados para o armazenamento de dados em memória auxiliar são criados em linguagem de máquina, de modo a ocuparem menor espaço.

## IV.2 - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

### IV.2.1 - PROGRAMA PRINCIPAL

Característico das linguagens estruturadas, através do programa principal são acionadas as subrotinas responsáveis pela análise convencional e pela impressão e combinação dos resultados, além da subrotina de controle da



análise incremental construtiva. A figura (IV.1) apresenta um diagrama indicando a sequência com que as subrotinas são acionadas no decorrer das análises. Os itens seguintes descrevem resumidamente a função de cada uma destas subrotinas.

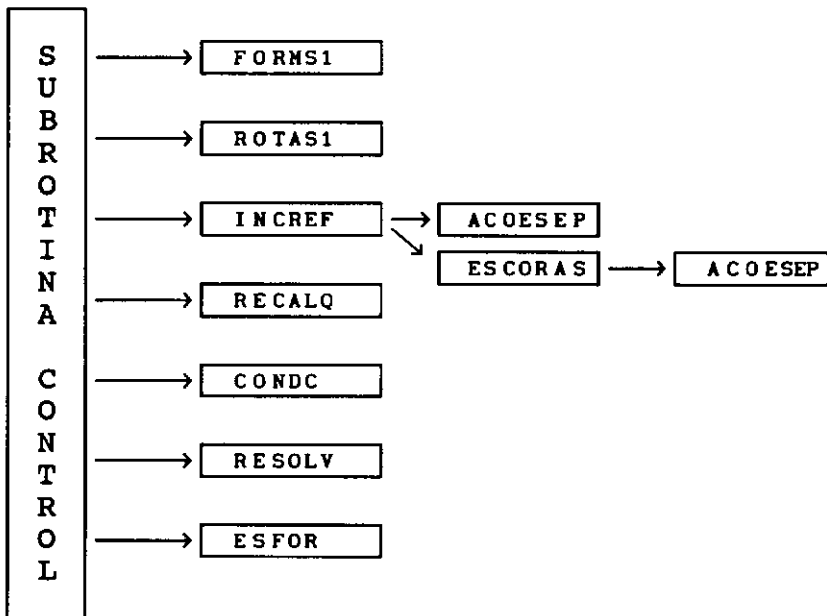
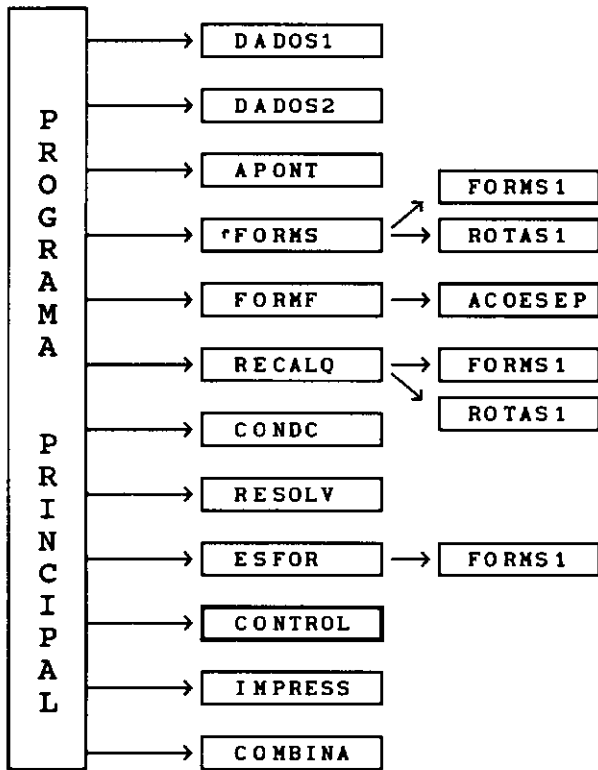


Figura IV.1 - Rotinas do programa ACON

No programa principal, antes do início da análise, são feitas opções via tela sobre resultados desejados para impressão. A possibilidade de que esta seleção seja feita neste ponto do programa evita o cálculo ou o armazenamento de resultados desnecessários.

#### IV.2.2 - SUBROTINA DADOS1

Nesta subrotina é feita a leitura dos dados topológicos da estrutura. A numeração dos elementos é própria para cada tipo de andar da estrutura: os elementos são numerados de 1 até o número total de elementos deste tipo de andar, indicando ainda em quais andares esta geometria se repete. Internamente, então, estes elementos são renumerados para que possam ser trabalhados de modo mais eficiente.

A numeração dos nós para cada andar, além da conectividade dos elementos, é relacionada a um eixo global X, perpendicular à altura da edificação e de origem qualquer. Assim, projetando-se todos os nós da estrutura sobre este eixo, numeram-se os nós de 1 até o número total de projeções. A partir daí, tanto as coordenadas dos nós como a conectividade dos elementos serão referidos a essa numeração, sendo renumerados apenas para uso interno.

Nesta etapa do programa são introduzidas ainda as características dos materiais e das seções transversais dos

elementos; além disso, faz-se a verificação das dimensões das diversas matrizes envolvidas até aqui, podendo ser interrompida a execução do programa caso o dimensionamento de alguma destas matrizes tenha sido excedido. Neste caso, uma mensagem em tela indica onde este problema se verificou.

#### IV.2.3 - SUBROTINA DADOS2

Neste ponto são lidos os dados referentes aos carregamentos. Os tipos de carregamento recebem tratamento semelhante ao dos tipos de andar em relação à maneira de defini-los ao longo da altura da edificação. Os carregamentos a aplicar são armazenados em memória auxiliar para futura utilização. Nesta etapa verifica-se também a possível existência de erros na definição dos carregamentos (a exemplo da subrotina DADOS1, é emitida uma mensagem indicativa do tipo de erro).

#### IV.2.4 - SUBROTINA APONT

O programa ACON utiliza a técnica do perfil para efetuar o armazenamento da matriz de rigidez global da estrutura. Esta técnica permite que se armazene em um único vetor apenas os coeficientes de cada coluna a partir do primeiro não nulo. A posição deste índice é definida nesta subrotina, sendo então armazenada em um outro vetor chamado vetor apontador, de dimensão igual ao número total de deslocamentos da estrutura.

#### IV.2.5 - SUBROTINA FORMS

A subrotina FORMS monta a matriz de rigidez global da estrutura, através da acumulação dos coeficientes da matriz de rigidez de cada elemento em seu referencial local (subrotina FORMS1) e devidamente rotacionada para o referencial global (subrotina ROTAS1). A matriz de rigidez da estrutura é armazenada em memória auxiliar.

#### IV.2.6 - SUBROTINA FORMF

Nesta fase são criados os vetores de forças nodais combinadas para a estrutura completa, ações estas que serão inicialmente aplicadas à estrutura de acordo com o procedimento convencional, a partir dos carregamentos previamente armazenados em memória auxiliar. Após a montagem dos vetores, computando-se as forças aplicadas diretamente nos nós, é acionada a subrotina ACOESEP, que transforma as forças que atuam nos elementos (devidas aos carregamentos externos, térmicos ou de peso próprio) em forças nodais equivalentes, adicionando-as também aos respectivos vetores. As forças aplicadas diretamente aos nós já estão no referencial global, enquanto as ações aplicadas nos elementos precisam ser rotacionadas, com exceção da carga de peso próprio quando considerada de forma automática.

#### IV.2.7 - SUBROTINA RECALQ

Nesta fase da análise verifica-se a existência ou não de recalques de apoio. Em caso afirmativo, para cada elemento ligado ao nó que sofreu o recalque, calculam-se forças nodais equivalentes a esse deslocamento, somando-as aos vetores de forças globais.

#### IV.2.8 - SUBROTINA CONDC

Dentro desta subrotina são impostas as demais restrições nodais da estrutura, através da técnica do número muito grande [8], que simula a existência de um elemento de rigidez muito grande em relação à rigidez dos demais elementos, ligando o nó restringido da estrutura ao meio exterior. Este procedimento reproduz com mais precisão o comportamento real dos apoios do que a consideração de que os mesmos sejam totalmente indeslocáveis na direção da restrição.

A imposição de condições de contorno a uma estrutura, seja por este ou por outro método, acarreta alterações na matriz de rigidez global. Por este motivo, para que se possa conservar a matriz original, optou-se por gravá-la em memória auxiliar antes destas alterações.

#### IV.2.9 - SUBROTINA RESOLV

Aqui são resolvidos os sistemas de equações para

os diversos vetores independentes de forças nodais, pelo método de Cholesky, obtendo-se os deslocamentos nodais e, a partir destes, as reações de apoio. Estes deslocamentos e reações são acumulados (quando se tratar de alguma etapa de análise incremental) e em seguida gravados em disco para posterior impressão ou combinação.

#### IV.2.10 - SUBROTINA ESFOR

Os esforços nos elementos são calculados nesta subrotina. Quando a análise incremental é efetuada, os esforços resultantes de cada uma das etapas são acumulados com os anteriormente obtidos para os pavimentos superiores ao pavimento em questão, sendo depois gravados em memória auxiliar, a exemplo dos deslocamentos e das reações de apoio.

#### IV.2.11 - SUBROTINA CONTROL

É a subrotina que dá início à análise incremental, controlando todo o seu processamento. Nesta parte do programa será analisado um número de estágios de carregamento igual ao número de andares, acrescido da defasagem máxima entre os carregamentos incrementais. A análise é feita no sentido inverso ao da construção, basicamente porquê, aproveitando-se a estrutura original do programa-base, na qual a análise convencional da estrutura é executada, já se possui a matriz de rigidez da estrutura completa, gravada em memória auxiliar antes das condições

de contorno serem impostas. Assim, quando se for retirar um andar da estrutura, recupera-se a matriz da estrutura completa e subtrai-se dela a rigidez correspondente aos elementos do andar retirado, gravando a matriz resultante sobre a matriz anterior, procedendo-se deste modo até a última análise, que é a do primeiro andar. Outra vantagem desta sequência é que, à medida em que as análises vão sendo efetuadas, fazendo com que também aumente o tamanho dos arquivos que armazenam resultados destas análises, o tamanho do arquivo de armazenamento da matriz de rigidez global segue o caminho inverso, contrabalançando em parte o gasto de memória auxiliar.

Ao final de todas as análises, efetuadas de forma análoga à convencional, faz-se a pesquisa de esforços extremos, caso desejado. Esta pesquisa consiste na determinação, para cada andar e para cada elemento, dos esforços extremos máximos e mínimos, indicando em que etapa de carregamento os mesmos ocorrem. Os esforços assim obtidos são também armazenados em memória auxiliar para que, além de formarem uma tabela, possam ser combinados com os esforços provenientes dos demais carregamentos.

#### IV.2.12 - SUBROTINA INCREP

Após a montagem da matriz de rigidez global para a etapa em andamento conforme procedimento descrito, é criado nesta subrotina o vetor de forças nodais. Este vetor incluirá apenas as cargas de caráter incremental, indicadas



pelo usuário quando da definição dos dados de entrada do programa. Deste modo, as cargas de peso próprio serão ativadas para o último andar capaz de resistir às solicitações, juntamente com as cargas acidentais de montagem devidas ao trânsito de operários ou ao depósito de materiais. De acordo com a defasagem especificada, são consideradas também as ações da alvenaria e do revestimento.

#### IV.2.13 - SUBROTINA ESCORAS

Caso se tenha optado pela simulação do efeito do escoramento, a subrotina ESCORAS é acionada pela subrotina INCREF. No presente programa a ação do escoramento é considerada através da aplicação da carga de peso próprio do andar escorado distribuindo-se de modo uniforme (devido à remota possibilidade de conhecimento prévio do número e da disposição das escoras) pelo andar que lhe é imediatamente inferior. Esta consideração segue as idéias básicas das referências [1] e [6].

#### IV.2.14 - SUBROTINA IMPRESS

Neste ponto são recuperados da memória auxiliar e novamente impressos os resultados selecionados no início da análise, desta vez porém em um formato final.

#### IV.2.15 - SUBROTINA COMBINA

Nesta subrotina podem ser feitas as combinações de esforços finais (incrementais ou não) ou extremos, além de deslocamentos e reações (incrementais ou não), para os vários carregamentos considerados. As combinações, que são as superposições de vários carregamentos multiplicados por determinados coeficientes, podem ter sua saída através de tela, de unidade de disco ou de impressora.

#### IV.2.16 - MÓDULO GRÁFICO - ACESSO PELO PROGRAMA SALT

O programa ACON pode ser inserido no sistema SALT e, desta forma, fazer uso das rotinas gráficas deste sistema. O sistema SALT (Sistema para Análise Linear de estruturas) está em fase de desenvolvimento na UFRJ sob responsabilidade dos professores Silvio de Sousa Lima e Humberto Lima Soriano, e consta de um sistema de programas para análise linear estática e dinâmica de estruturas (referência [21]).

## CAPÍTULO V

### EXEMPLOS

#### V.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o objetivo de demonstrar a importância da análise incremental construtiva de edificações, são a seguir apresentados alguns exemplos, através dos quais foram estudadas tanto estruturas reais como fictícias. Estas estruturas foram analisadas com o auxílio do programa ACON, descrito no capítulo anterior.

Para efeito de análise, as estruturas foram desmembradas em pórticos planos. Foi considerado o efeito de diafragma das lajes, como forma de compatibilização dos deslocamentos horizontais em cada andar.

A escolha dos pórticos a analisar foi realizada de modo a procurar englobar as características da maioria das estruturas correntes de edifícios, podendo-se com isto generalizar os resultados obtidos dos exemplos para tais estruturas.

Para cada um dos pórticos considerados nos

exemplos foi efetuada a análise tanto pelo procedimento incremental construtivo como pelo procedimento convencional, verificando-se não apenas as diferenças entre os resultados decorrentes de cada procedimento, como também a relevância desta diferença em função da envoltória dos esforços para as piores situações de carregamento. Além da comparação entre os dois procedimentos de análise, estudou-se, através dos exemplos, o comportamento das estruturas em relação a outras variantes envolvidas na análise, bem como em relação às maneiras de melhor simular, nesta análise, o comportamento real das estruturas.

Nas estruturas analisadas não foram incluídos os efeitos da fluência e da retração. Em vista do exposto anteriormente, a ação do vento não foi considerada como atuando durante a construção.

## V.2 - EDIFÍCIO I

Como primeiro exemplo foi escolhido um quadro do Edifício Sete de Setembro, analisado em trabalho de consultoria pela COPPE/UFRJ em 1972. Este edifício, situado no centro do Rio de Janeiro e composto de 23 andares, foi, para efeito de análise, discretizado em 5 quadros aproximadamente paralelos entre si, e que compõem o sistema resistente ao carregamento lateral. Um croqui do pavimento tipo é apresentado na figura (V.1), aparecendo em destaque o quadro V, que foi o selecionado para ser analisado de

acordo com os procedimentos aqui definidos.

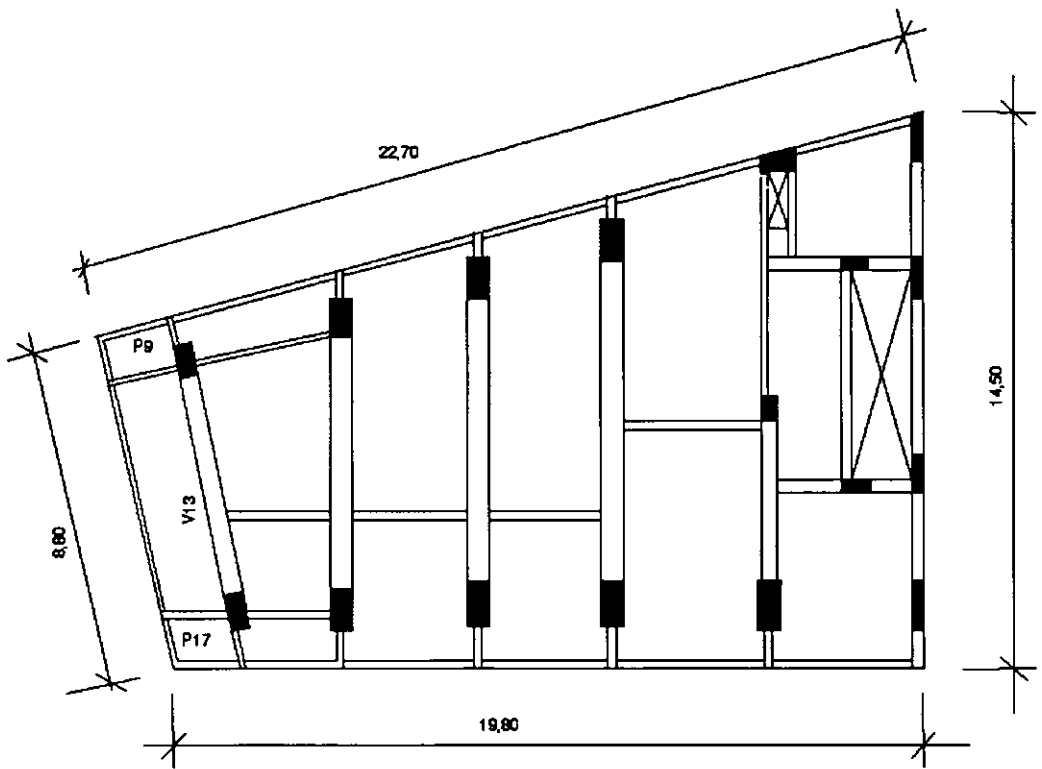
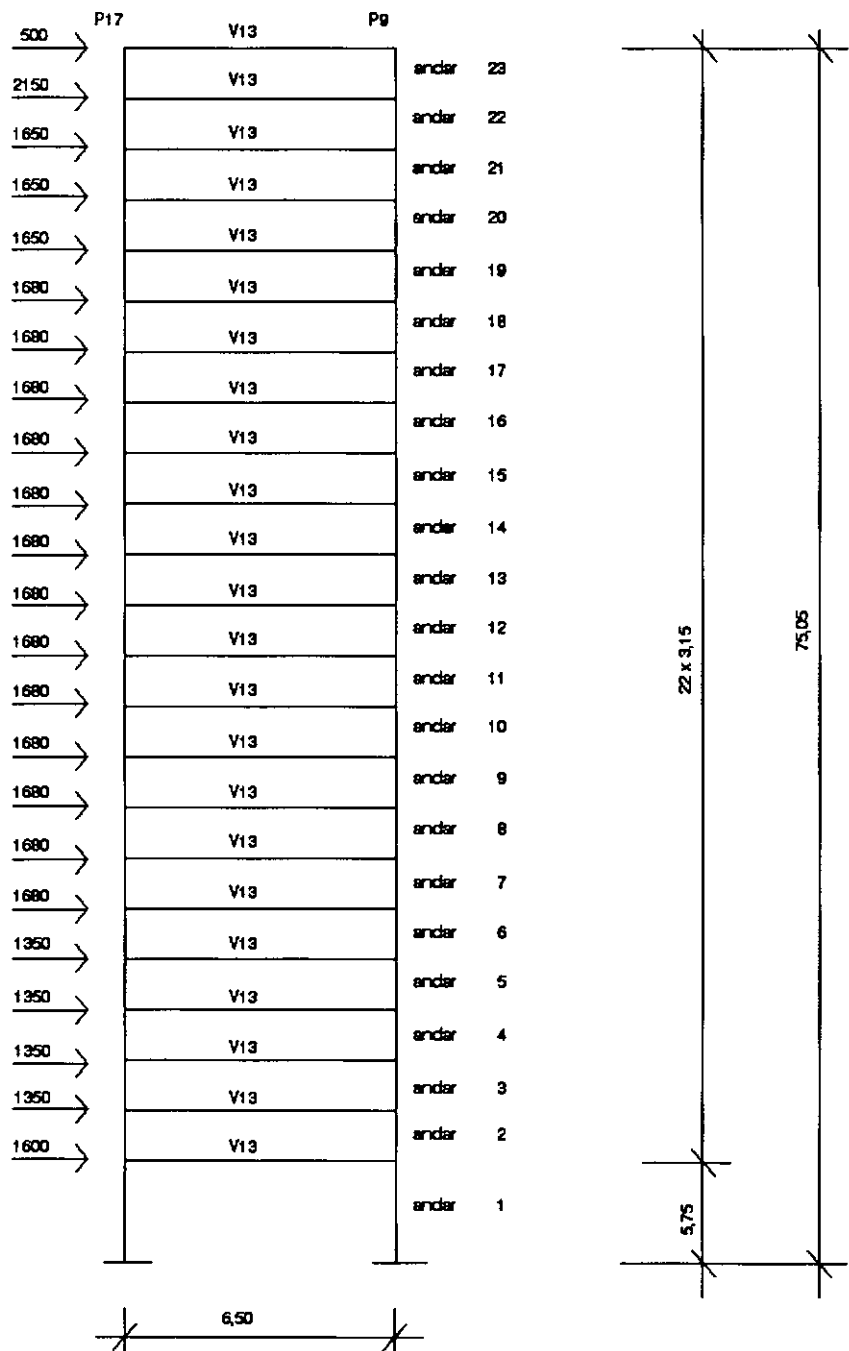
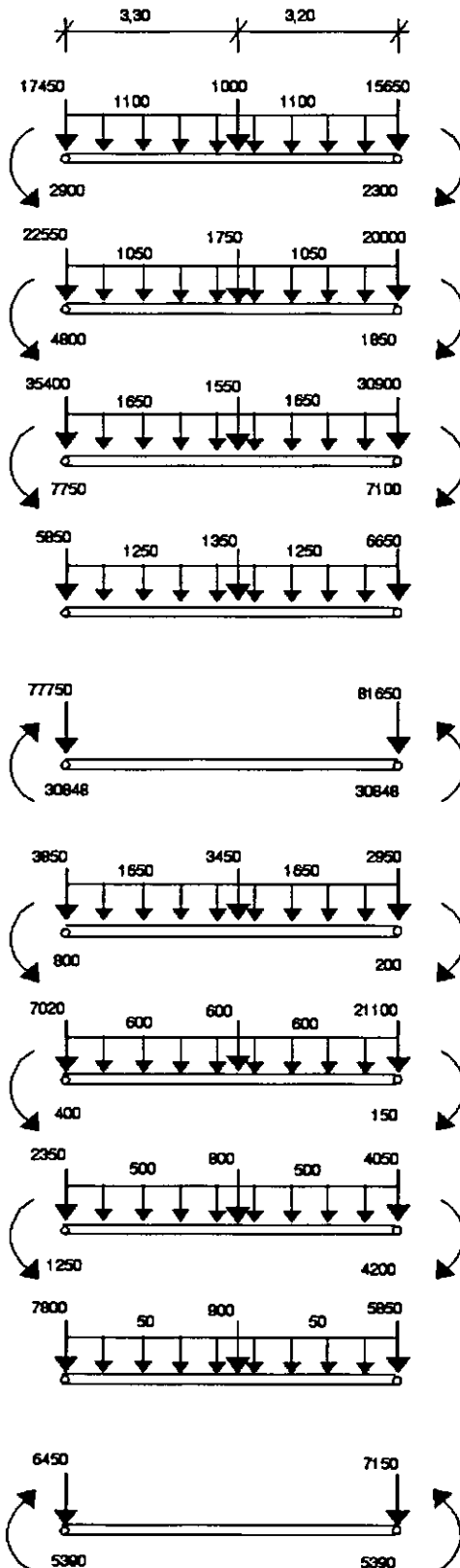


Figura V.1 - Ed. Sete de Setembro : croqui do pavimento tipo (unidades em m)

No estudo do referido quadro, discretizado na figura (V.2), procurou-se reproduzir de forma fiel a estrutura analisada na COPPE. Os carregamentos aplicados à estrutura foram separados em permanente, acidental e de vento. O carregamento devido ao vento está representado também na figura (V.2), enquanto os demais aparecem definidos a figura (V.3). Não foi considerada na análise a deformação devido ao esforço cortante.



FiguraV.2 - Quadro V : geometria e carga de vento  
(unidades em Kgf e m)



carga permanente:  
andar 23

carga permanente:  
andares 3 a 22

carga permanente:  
andar 2

carga permanente:  
andar 1

carga permanente:  
nível terreo

carga accidental:  
andar 23

carga accidental:  
andares 3 a 22

carga accidental:  
andar 2

carga accidental:  
andar 1

carga accidental:  
nível terreo

Figura V.3 - Carregamentos aplicados ao quadro V  
(unidades em Kgf e m)

Em complemento às figuras (V.2) e (V.3), tem-se ainda as seguintes considerações:

-Quanto às características elásticas do material:

-Módulo de elasticidade longitudinal:

$$E = 210.000 \text{ Kgf/cm}^2 \text{ (21.000 MPa)}$$

-Módulo de elasticidade transversal:

$$G = 0$$

-Quanto às seções transversais:

-Área da seção transversal das vigas:

$$A_v = 0,33 \text{ m}^2$$

-Inércia das vigas:

$$I_v = 0,00832 \text{ m}^4$$

-Área da seção transversal dos pilares:

$$A_p = 0,66 \text{ m}^2$$

-Inércia dos pilares:

$$I_p = 0,06655 \text{ m}^4$$

No que se refere especificamente à análise pelo procedimento incremental, não foi simulado o efeito do escoramento, como também não foi considerada a atuação de cargas acidentais durante a construção.

Na análise da estrutura com o carregamento do quadro V, o carregamento de caráter incremental consistiu apenas da carga permanente. Após a análise incremental, o efeito deste carregamento foi combinado com o da carga



acidental de ocupação e com o efeito da carga de vento, de modo a se obter as piores situações de solicitação na estrutura. Paralelamente a este procedimento, e para fins de comparação, a carga permanente foi ainda analisada segundo o procedimento convencional, sendo também os esforços resultantes desta análise devidamente combinados com os fornecidos para os demais carregamentos atuantes.

Nas figuras (V.4) e (V.5) visualiza-se a variação ao longo da altura dos deslocamentos verticais diferenciais entre os nós situados em um mesmo andar do pórtico, para o carregamento permanente e para o carregamento vertical total (permanente mais accidental), respectivamente. Nestas figuras, os deslocamentos representados pelos símbolos indicados nas legendas são referentes ao nível de cada andar da edificação. As linhas que unem estes deslocamentos servem apenas para dar maior clareza aos gráficos.

Pela figura (V.4) é possível verificar claramente a grande discrepância entre os deslocamentos diferenciais verticais obtidos por um ou outro procedimento de análise. Esta diferença, que é praticamente nula para os nós situados ao nível do primeiro andar, vai aumentando consideravelmente ao longo da altura da edificação, na medida em que a análise convencional passa a acumular deslocamentos inexistentes. Assim, por este procedimento, o deslocamento diferencial vertical máximo ocorre no último andar, enquanto pelo procedimento incremental este deslocamento se dá aproximadamente à meia altura da

edificação.

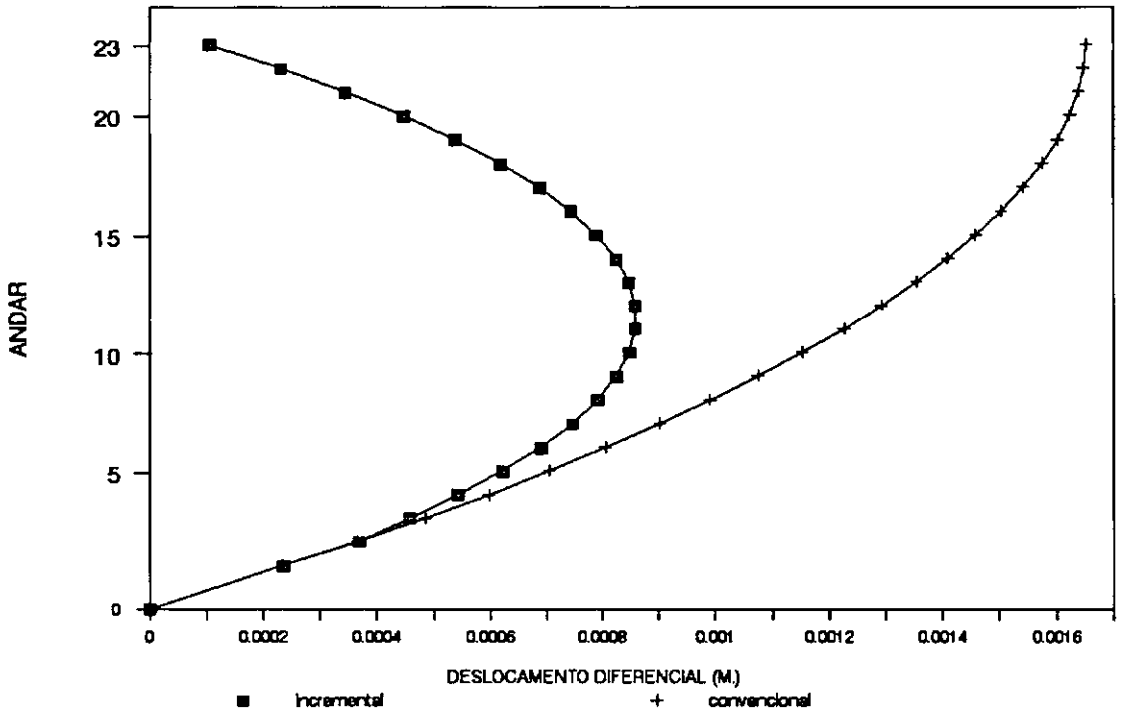


Figura V.4 - Carregamento incremental :  
deslocamento diferencial vertical

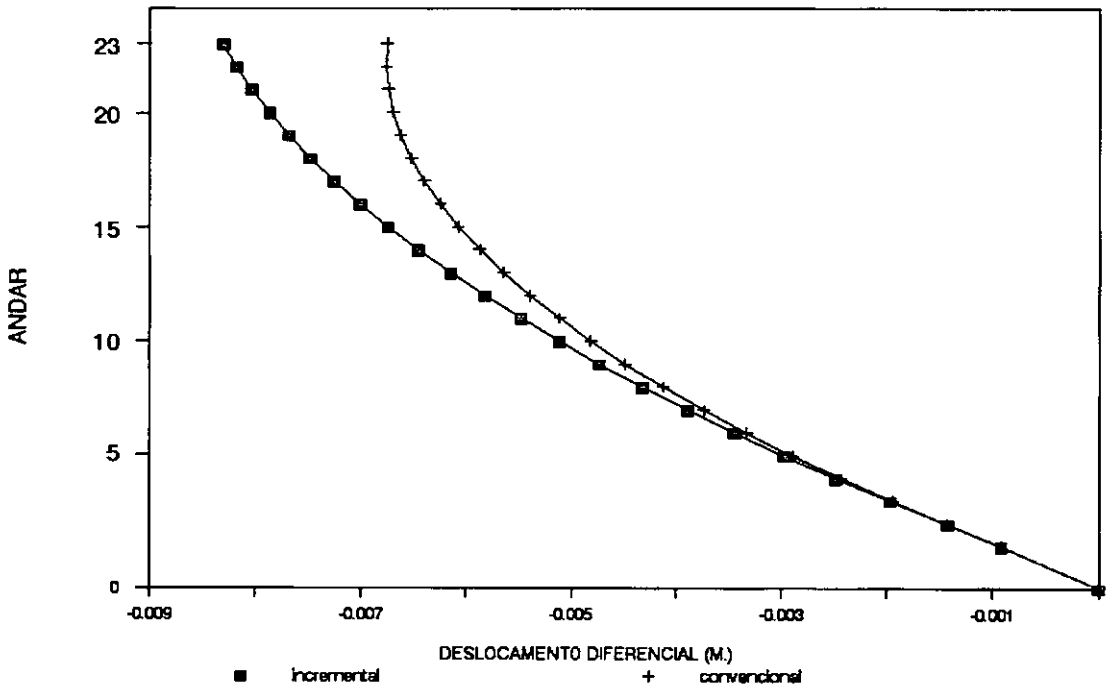


Figura V.5 - Carregamento vertical total :  
deslocamento diferencial vertical

Na figura (V.5), que ilustra a consideração da totalidade do carregamento vertical, a diferença entre os deslocamentos verticais diferenciais obtidos por um ou por outro procedimento sofreu uma grande redução, já que a ambos foi somado o efeito da carga accidental de ocupação, que foi analisada de forma convencional. Verifica-se que, ainda assim, a diferença entre os deslocamentos obtidos por ambos os procedimentos é bastante significativa. Deve-se atentar para o fato de que neste exemplo um dos pilares está submetido à maior parcela do carregamento permanente, enquanto o outro pilar suporta a maior parte do carregamento accidental, daí decorrendo a inversão no sinal dos deslocamentos diferenciais verticais, quando se compara as figuras (V.4) e (V.5).

Para ilustrar a diferença entre os esforços resultantes de cada procedimento de análise, estudou-se os momentos fletores no pilar da esquerda (pilar P17). Para cada um dos carregamentos atuantes, isoladamente, as tabelas (V.1) e (V.2) indicam estes momentos. Nestas tabelas, uma diferença percentual positiva significa que a análise pelo procedimento convencional resultou em superestimação dos resultados. Em contrapartida, uma diferença percentual negativa indica uma situação contrária à segurança da estrutura.

and.	Convenc.	Increment.	$\frac{C-I}{C} \%$	Acidental	Vento
1	-2193	-3915	-78,5	4359	113400
2	-4514	-1378	69,5	4285	49100
3	-281	-1799	-84,4	3656	37660
4	-1888	-1812	4,0	2270	30530
5	-3163	-1774	43,9	2468	25860
6	-2990	-1735	42,0	2263	23040
7	-3103	-1696	45,3	2110	19590
8	-3088	-1658	46,3	1913	17460
9	-3079	-1619	47,4	1712	15180
10	-3052	-1580	48,2	1502	13310
11	-3020	-1541	49,0	1290	11520
12	-2986	-1503	49,7	1076	9834
13	-2949	-1464	50,4	861	8201
14	-2912	-1426	51,0	645	6617
15	-2875	-1388	51,7	428	5075
16	-2837	-1350	52,4	212	3579
17	-2801	-1313	53,1	-6	2138
18	-2766	-1279	53,8	-221	774
19	-2733	-1245	54,4	-451	-473
20	-2710	-1231	54,6	-630	-1586
21	-2682	-1171	56,3	-1011	-2458
22	-2728	-1348	50,6	-647	-2906
23	-2597	-734	71,7	-3149	-2597

Tabela V.1 - Pilar P17 : Momento Inferior (Kgf.m)

and.	Convenc.	Increment.	$\frac{C-I}{C} \%$	Acidental	Vento
1	-1013	-4062	-301,0	-4992	-11590
2	638	2019	-216,5	-4516	5715
3	1159	906	21,8	-4385	15070
4	-2117	-3169	-49,7	-5113	19940
5	-2183	-3208	-47,0	-4972	22990
6	-2004	-3247	-62,0	-4856	23640
7	-1984	-3285	-65,6	-4679	24110
8	-1974	-3324	-68,4	-4489	23720
9	-1990	-3363	-69,0	-4285	23160
10	-2015	-3402	-68,8	-4076	22440
11	-2047	-3440	-68,1	-3864	21560
12	-2082	-3479	-67,1	-3650	20610
13	-2118	-3518	-66,1	-3434	19600
14	-2155	-3556	-65,0	-3218	18540
15	-2193	-3594	-63,9	-3002	17430
16	-2230	-3632	-62,9	-2785	16280
17	-2266	-3668	-61,9	-2571	15080
18	-2302	-3705	-60,9	-2342	13790
19	-2331	-3725	-59,8	-2163	12440
20	-2368	-3795	-60,3	-1792	10960
21	-2342	-3643	-55,6	-2142	9231
22	-2501	-4270	-70,7	273	7080
23	-1856	-1829	1,5	-7784	3384

Tabela V.2 - Pilar P17 : Momento Superior (Kgf.m)

De posse destas tabelas, pode-se perceber a grande diferença nos resultados obtidos pela análise incremental quando comparados aos da análise convencional. A análise incremental, em relação a esta última, fornece para os pilares valores maiores para os momentos superiores e menores para os inferiores.

Nas tabelas (V.3) e (V.4) estão listados os valores obtidos por envoltórias dos momentos inferiores e superiores, respectivamente. Para a obtenção destas envoltórias dos esforços foram consideradas as seguintes combinações de carregamentos:

- permanente;
- permanente+acidental;
- permanente+vento;
- permanente-vento;
- permanente+acidental+vento;
- permanente+acidental-vento.

Os asteriscos assinalam onde houve inversão nos sentidos dos esforços.

and.	max.Conv.	max.Incr.	$\frac{C-I}{C} \%$	min.Conv.	min.Incr.	$\frac{C-I}{C} \%$
1	-115600	-117300	-1,5	115600	113800	1,6
2	-53620	-50480	5,9	48870	52010	-6,4
3	-37940	-39460	-4,0	41030	39520	3,7
4	-32420	-32340	0,2	30910	30990	-0,3
5	-29020	-27630	4,8	25160	26550	-5,5
6	-26030	-24770	4,8	22310	23570	-5,6
7	-22690	-21290	6,2	18600	20000	-7,5
8	-20550	-19120	7,0	16280	17720	-8,8
9	-18260	-16800	8,0	13810	15270	-10,6
10	-16360	-14890	9,0	11760	13230	-12,5
11	-14540	-13070	10,1	9793	11270	-15,1
12	-12820	-11340	11,5	7924	9407	-18,7
13	-11150	-9666	13,3	6113	7598	-24,3
14	-9529	-8043	15,6	4349	5836	-34,2
15	-7950	-6463	18,7	2629	4115	-56,5
16	-6416	-4929	23,2	953	2440	-156,
17	-4945	-3458	30,1	-663	825	*
18	-3761	-2275	39,5	-1992	-505	74,6
19	-3657	-2169	40,7	-2260	-772	65,8
20	-4926	-3447	30,0	-1124	355	*
21	-6151	-4640	24,6	-224	1287	*
22	-6281	-4901	22,0	178	1558	-775,
23	-8342	-6480	22,3	-2597	1862	*

Tabela V.3 - Pilar P17 : Momento Inferior - envoltórias  
(Kgf.m)

and.	max.Conv.	max.Incr.	$\frac{C-I}{C} \%$	min.Conv.	min.Incr.	$\frac{C-I}{C} \%$
1	-17590	-20640	-17,3	10570	7524	28,8
2	6353	7734	-21,7	-9593	-8211	14,4
3	16230	15980	1,5	-18290	-18550	-1,4
4	-27170	-28220	-3,9	17820	16770	5,9
5	-30150	-31170	-3,4	20810	19780	4,9
6	-30500	-31740	-4,1	21640	20390	5,8
7	-30770	-32070	-4,2	22120	20820	5,9
8	-30180	-31530	-4,5	21750	20400	6,2
9	-29440	-30810	-4,7	21170	19800	6,5
10	-28530	-29910	-4,8	20420	19030	6,8
11	-27480	-28870	-5,1	19520	18120	7,2
12	-26340	-27740	-5,3	18530	17130	7,6
13	-25150	-26550	-5,6	17480	16080	8,0
14	-23910	-25310	-5,9	16380	14980	8,5
15	-22630	-24030	-6,2	15240	13840	9,2
16	-21300	-22700	-6,6	14050	12650	10,0
17	-19910	-21310	-7,0	12810	11410	10,9
18	-18440	-19840	-7,6	11490	10090	12,2
19	-16940	-18330	-8,2	10110	8718	13,8
20	-15120	-16540	-9,4	8589	7162	16,6
21	-13710	-15020	-9,6	6888	5587	18,9
22	-9581	-11350	-18,5	4851	3082	36,5
23	-13020	-13000	0,2	1528	1555	-1,8

Tabela V.4 - Pilar P17 : Momento Superior - envoltórias  
(Kgf.m)



Considere-se agora, para o mesmo quadro analisado, a atuação de carga accidental durante a construção, correspondente a 20% da carga accidental de ocupação prevista por norma. Em vista do caráter incremental que esta carga passa a assumir, percebe-se que os esforços assim obtidos se afastarão ainda mais dos resultantes da análise convencional. Este comportamento, de fato, se verifica, e pode ser observado quando se compara a figura (V.6), que representa os deslocamentos diferenciais verticais para a situação de carregamento acima descrita, com a figura (V.4), correspondente apenas ao carregamento permanente. Vale ressaltar que, apesar de uma parcela da carga accidental ser considerada durante a construção, no final da análise construtiva incremental a estrutura é aliviada da referida parcela, fazendo com que os carregamentos totais considerados nas figuras (V.4) e (V.6) sejam idênticos.

Ao analisar-se apenas os deslocamentos diferenciais entre os pilares para cada um dos procedimentos, considerando-se apenas o carregamento vertical total (permanente mais accidental), a impressão inicial é a de que os esforços resultantes dos dois procedimentos de análise apresentam pouca diferença entre si (a figura (V.7), que representa os deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares para o carregamento vertical total, mostra pouca diferença para estes deslocamentos quando comparada com a figura (V.5)). Essa

impressão, contudo, decorre de uma peculiaridade inerente ao exemplo em estudo, anteriormente citada, que é o fato de um dos pilares estar submetido à maior parcela do carregamento permanente, e o outro pilar à a maior parte do carregamento accidental. Com isto ocorrem deslocamentos diferenciais com sinais inversos para um ou outro carregamento os quais, superpostos, resultam na figura (V.7). Deste modo, nota-se que uma grande diferença entre os deslocamentos diferenciais obtidos por um ou outro procedimento de análise é indicação segura para que se afirme ocorrerem grandes diferenças entre os esforços. Quando a grande diferença entre os deslocamentos não se verificar, porém, nada se pode afirmar, já que os esforços dependerão da história de aplicação destes carregamentos.

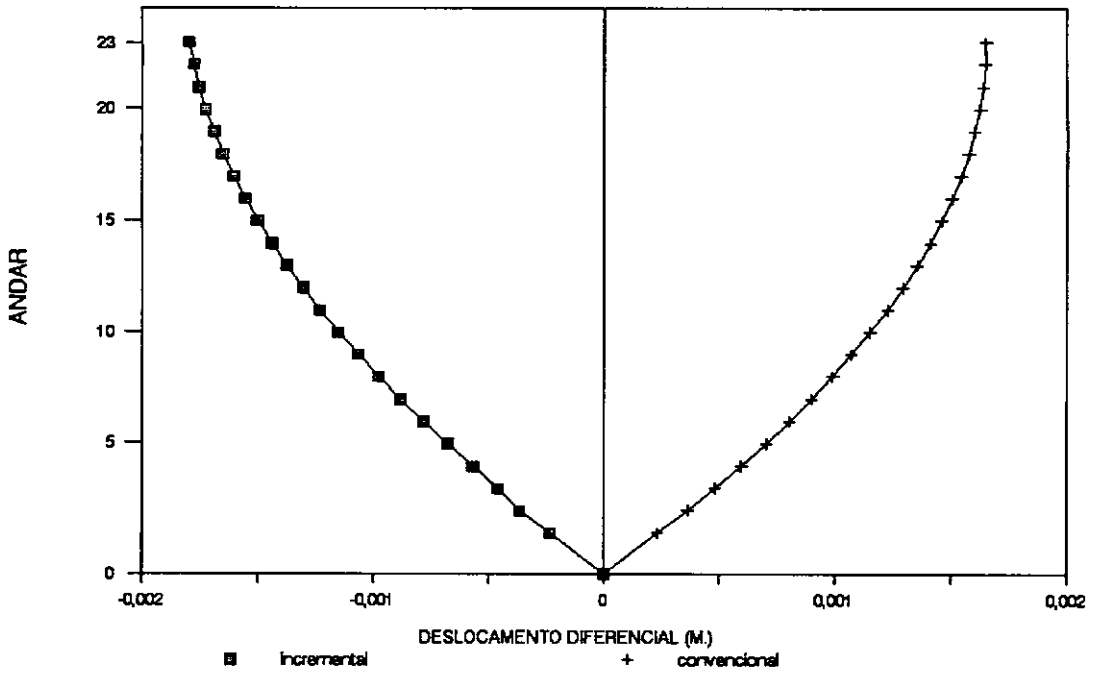


Figura V.6 - Carregamento incremental  
(com carga acidental de montagem):  
deslocamento diferencial vertical

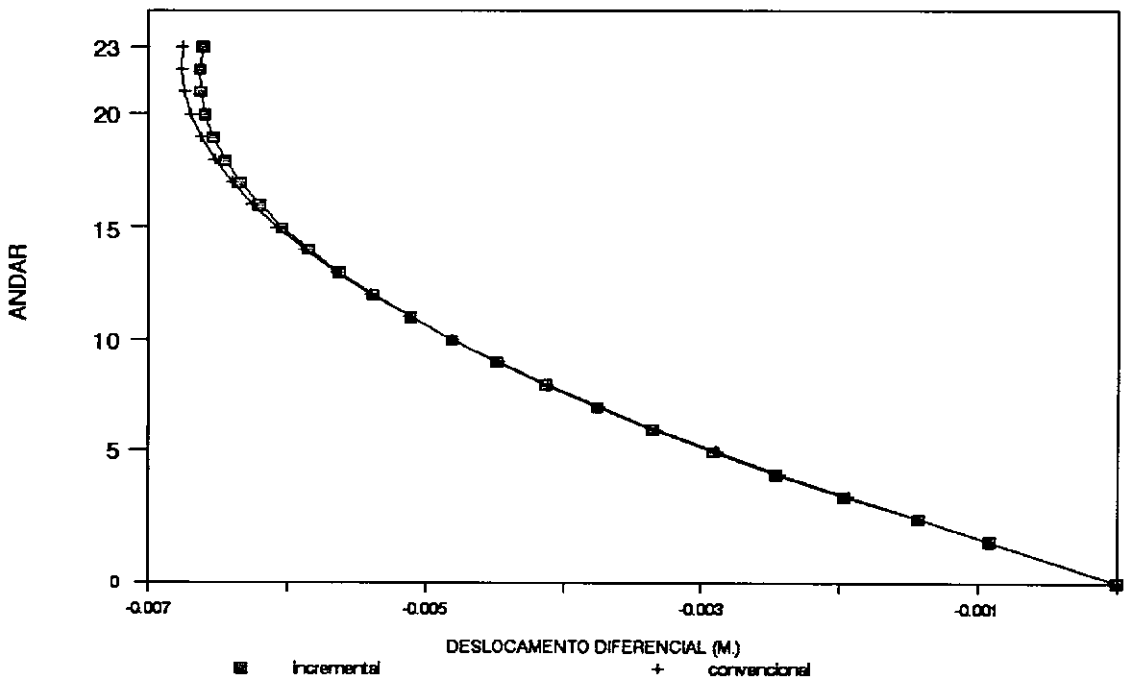


Figura V.7 - Carregamento vertical total  
(com carga acidental de montagem):  
deslocamento diferencial vertical

Neste exemplo não se verificou grande diferença para os esforços resultantes nas vigas. Este fato provavelmente deveu-se à pouca rigidez das mesmas em relação à dos pilares.

### V.3 - EDIFÍCIO 2

O segundo edifício analisado é constituído de 11 andares e tem finalidade residencial. As figuras (V.8) e (V.9) apresentam esquemas das plantas de forma do teto tipo e do teto do pavimento térreo.

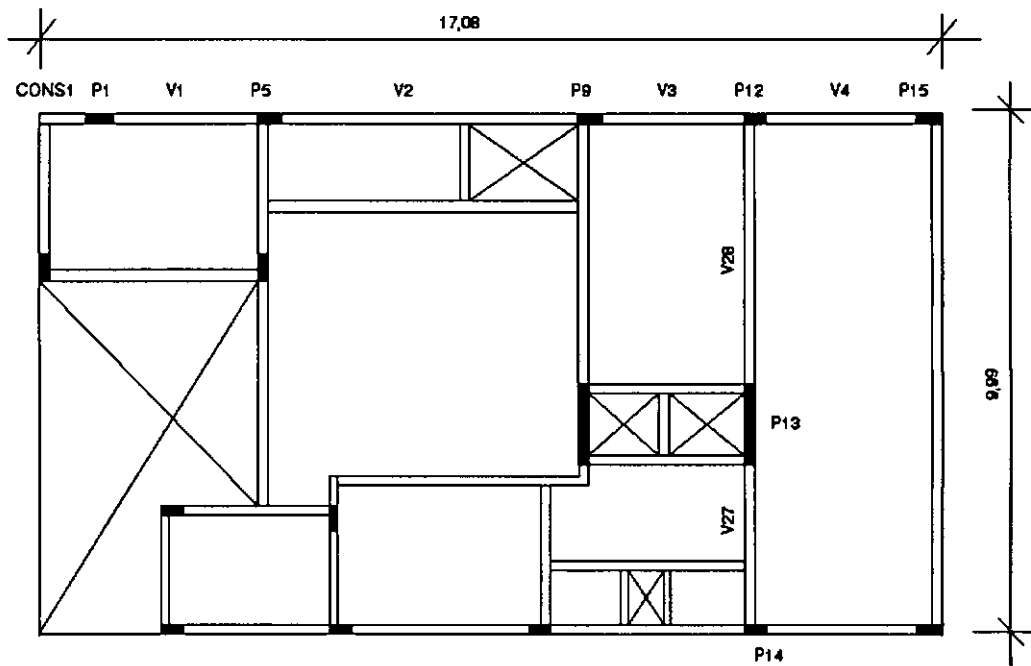


Figura V.8 - Teto tipo : formas (unidades em m)

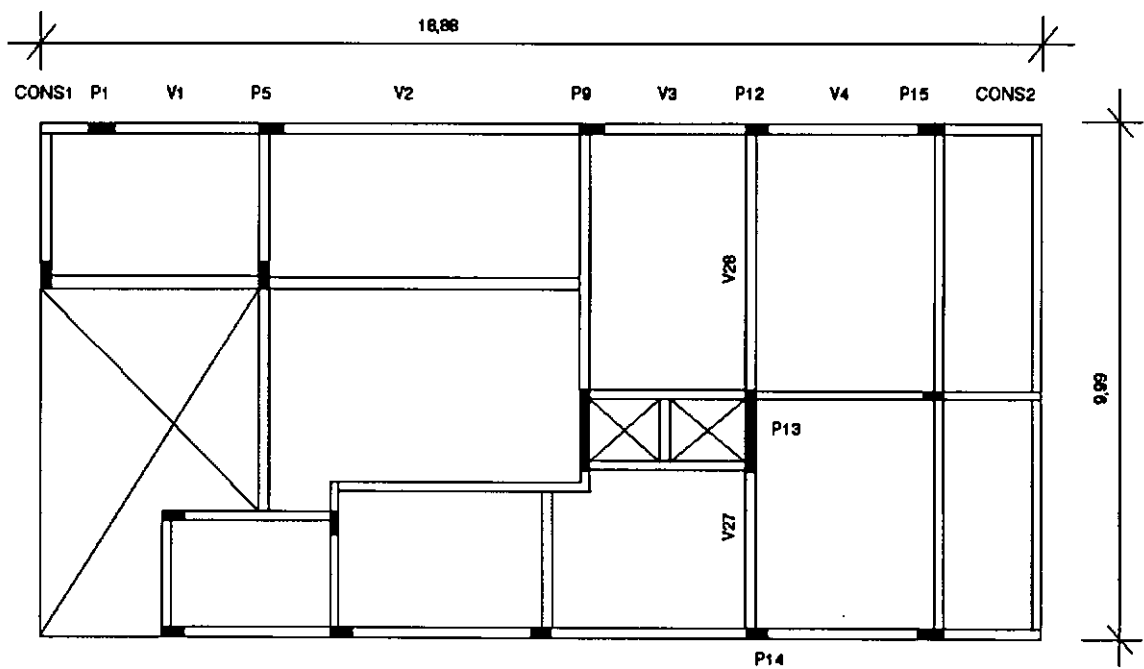


Figura V.9 - Teto pavimento térreo : formas (m)

Foram analisados dois pórticos deste prédio, sendo para ambos feitas as seguintes considerações:

-Quanto às características elásticas do material:

-Módulo de elasticidade longitudinal:

$$E = 300.000 \text{ Kgf/cm}^2 \text{ (30.000 MPa)}$$

-Módulo de elasticidade transversal:

$$G = 150.000 \text{ Kgf/cm}^2 \text{ (15.000 MPa)}$$

-Quanto à seção transversal: características listadas em tabelas específicas (tabelas (V.5) e (V.7));

-O peso próprio da estrutura pertencente ao plano do pórtico foi computado de forma automática. Para isto foi considerado o peso específico de  $2500 \text{ Kgf/m}^3$ ;

-Foi considerada a existência de nós finitos na análise das vigas, quando houvessem paredes estruturais ou pilares de grande dimensão da seção transversal no plano do pórtico;

-Foi incluída na análise a deformação devido ao esforço cortante;

-A carga de vento foi distribuída entre os diversos elementos resistentes através da compatibilização dos deslocamentos horizontais

no último piso (referência [22]);

-Foi simulado o efeito do escoramento para a análise incremental; as cargas de alvenaria e de revestimento foram consideradas como aplicadas à estrutura com defasagem de 2 andares em relação à aplicação do carregamento de peso próprio;

-Ainda para a análise incremental, foi considerada uma carga acidental de montagem como sendo 20% da carga acidental de ocupação.

O primeiro pórtico analisado, aqui chamado de quadro I, é formado pelas vigas V27 e V28 e pelos pilares P14, P13 e P12, cujas características estão representadas na tabela (V.5). A definição da geometria, bem como do carregamento devido ao vento, está indicada na figura (V.10), e a definição dos demais carregamentos é efetuada na figura (V.11). O carregamento vertical total é composto das seguintes parcelas:

-peso próprio da estrutura : 43,6 %

-alvenaria + revestimento : 34,9 %

-carga acidental : 21,5 %

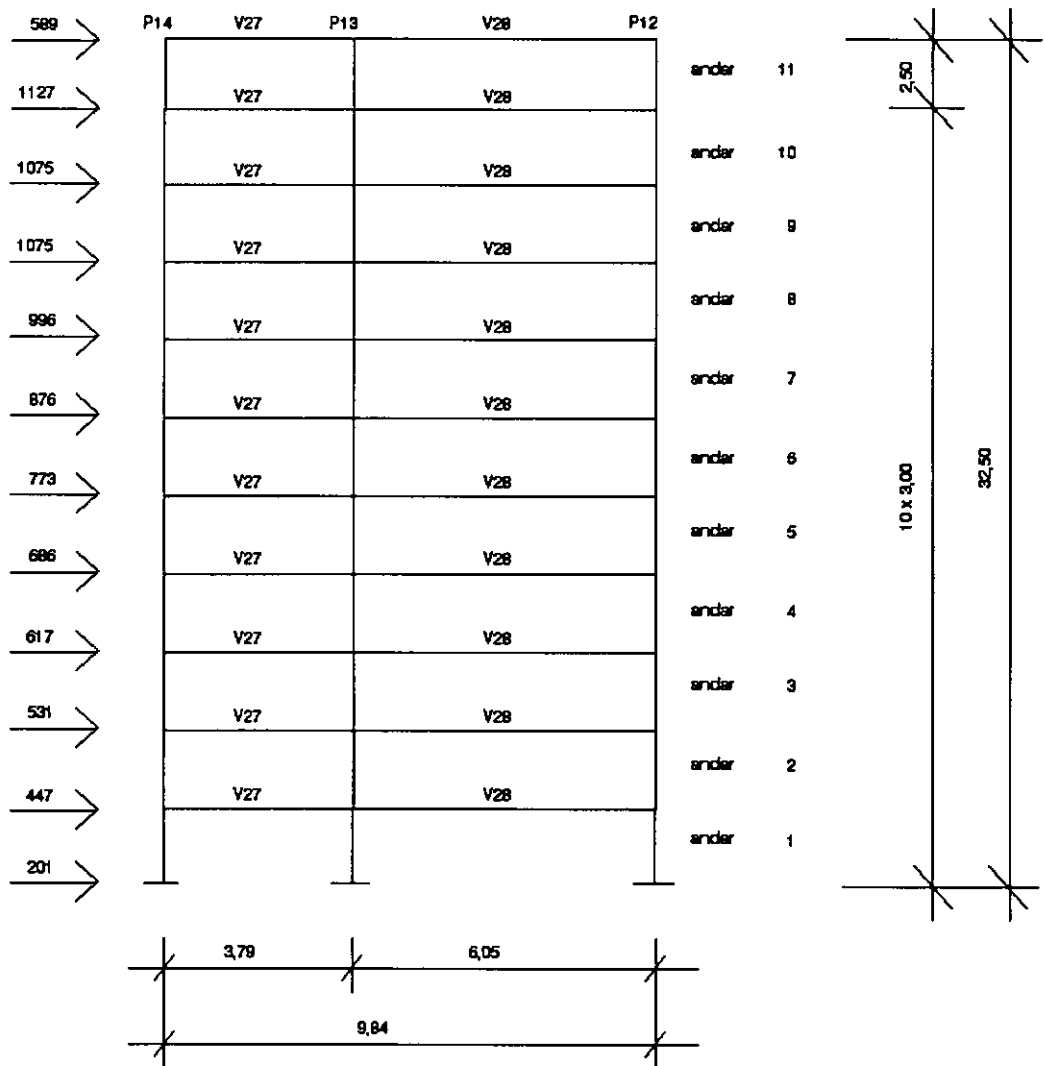
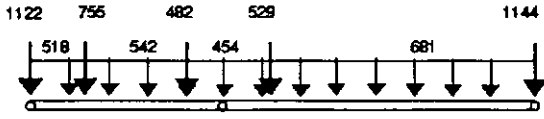
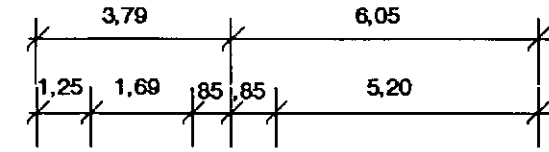
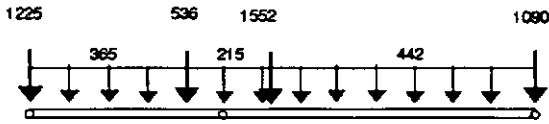


Figura V.10 - Quadro I : geometria e carga de vento  
(em Kgf e m)

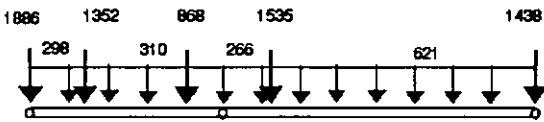




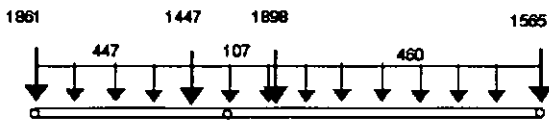
p.p. fora do plano:  
andares 2 a 11



p.p. fora do plano:  
andar 1



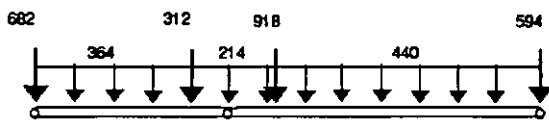
alvenaria+revestimento:  
andares 2 a 11



alvenaria+revestimento:  
andar 1



carga acidental:  
andares 2 a 11



carga acidental:  
andar 1

Figura V.11 - Quadro I: carregamentos verticais (Kg/m e m)

elto	andar	dimensões	área	inércia
V27	1 - 11	,10 x ,58	0,058	0,0016259
V28	1 - 11	,15 x ,38	0,057	0,0006859
P14	1 - 4	,60 x ,20	0,120	0,0004000
	5 - 7	,50 x ,15	0,075	0,0001406
	8 - 11	,40 x ,15	0,060	0,0001125
P13	1 - 4	,20 x 1,7	0,340	0,0818830
	5 - 11	,15 x 1,7	0,255	0,0614130
P12	1 - 4	,60 x ,25	0,150	0,0007813
	5 - 7	,50 x ,20	0,100	0,0003333
	8 - 11	,40 x ,15	0,060	0,0001125

Tabela V.5 - Quadro I : características das seções transversais (m)

Na figura (V.12) apresenta-se um gráfico comparativo dos deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares P14 e P13, para o carregamento vertical total. Neste gráfico são facilmente identificados os pontos onde ocorre variação na seção transversal dos elementos. Estes pontos separam cada diagrama em três trechos, tendo cada um deles um comportamento semelhante ao ilustrado nas figuras (V.4) a (V.7), que se referem a elementos de seção transversal constante ao longo de toda a altura da edificação. Observa-se que, para uma dada seção

transversal, o menor deslocamento diferencial ocorre no ponto inferior do trecho correspondente. Este deslocamento diferencial aumenta gradualmente até atingir seu valor máximo no ponto superior do trecho, ponto este que corresponde ao menor valor do trecho imediatamente superior, e assim sucessivamente até o topo da edificação.

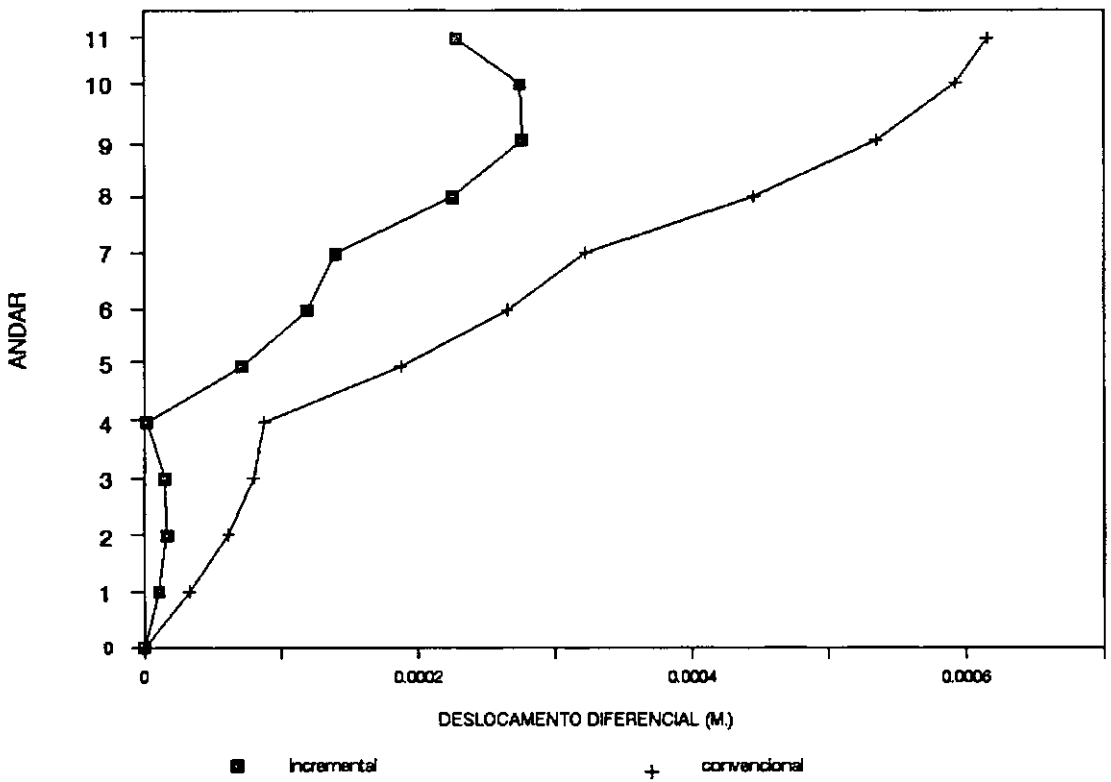


Figura V.12 - Deslocamentos diferenciais entre pilares

A superestimação dos deslocamentos diferenciais do quadro I, pelo procedimento convencional, faz com que

haja grande alteração nas solicitações em relação às fornecidas pelo procedimento incremental. Para isto contribui a grande rigidez das vigas em relação aos pilares de extremidade.

Plotados na figura (V.13) estão os momentos fletores nas vigas V27 para o carregamento vertical total. Observa-se que, de acordo com o procedimento usual de análise, chega a ocorrer uma inversão nos momentos das vigas, nas ligações destas com os pilares P14, nos andares superiores. Este fato decorre da suposição de que o pilar P14 sofre um deslocamento vertical bem superior ao do pilar P13. Como a diferença entre as rigidezes dos dois pilares é bastante acentuada, a viga V27, que une estes pilares, sofre uma deformação semelhante a de uma viga em balanço, engastada no pilar P13.

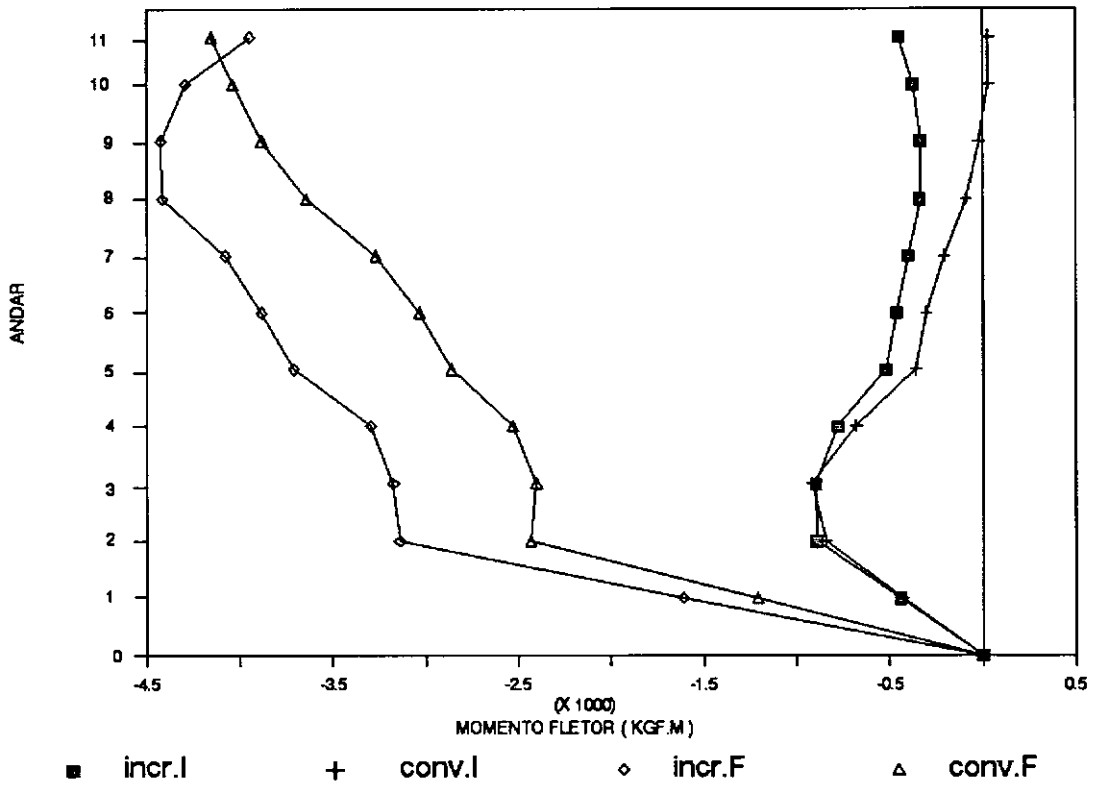


Figura V.13 - Momentos fletores nas vigas V27

Na figura (V.14) traçou-se os diagramas dos esforços flexionantes no pilar P14, para a totalidade do carregamento vertical. No gráfico referente à análise incremental verifica-se, para os andares inferiores, a repetição do fato observado no exemplo anterior, à respeito do maior valor fornecido para os momentos superiores de cada andar, ao contrário da análise convencional, na qual os momentos superiores e inferiores desses andares praticamente se equivalem.

Ainda em relação à figura (V.14), nota-se de forma clara os pontos onde ocorrem variações na seção transversal dos pilares, evidenciados pela grande redução nos esforços absorvidos pelo pilar, já que a viga, por não ter suas dimensões alteradas, apresentou um aumento relativo em sua rigidez.

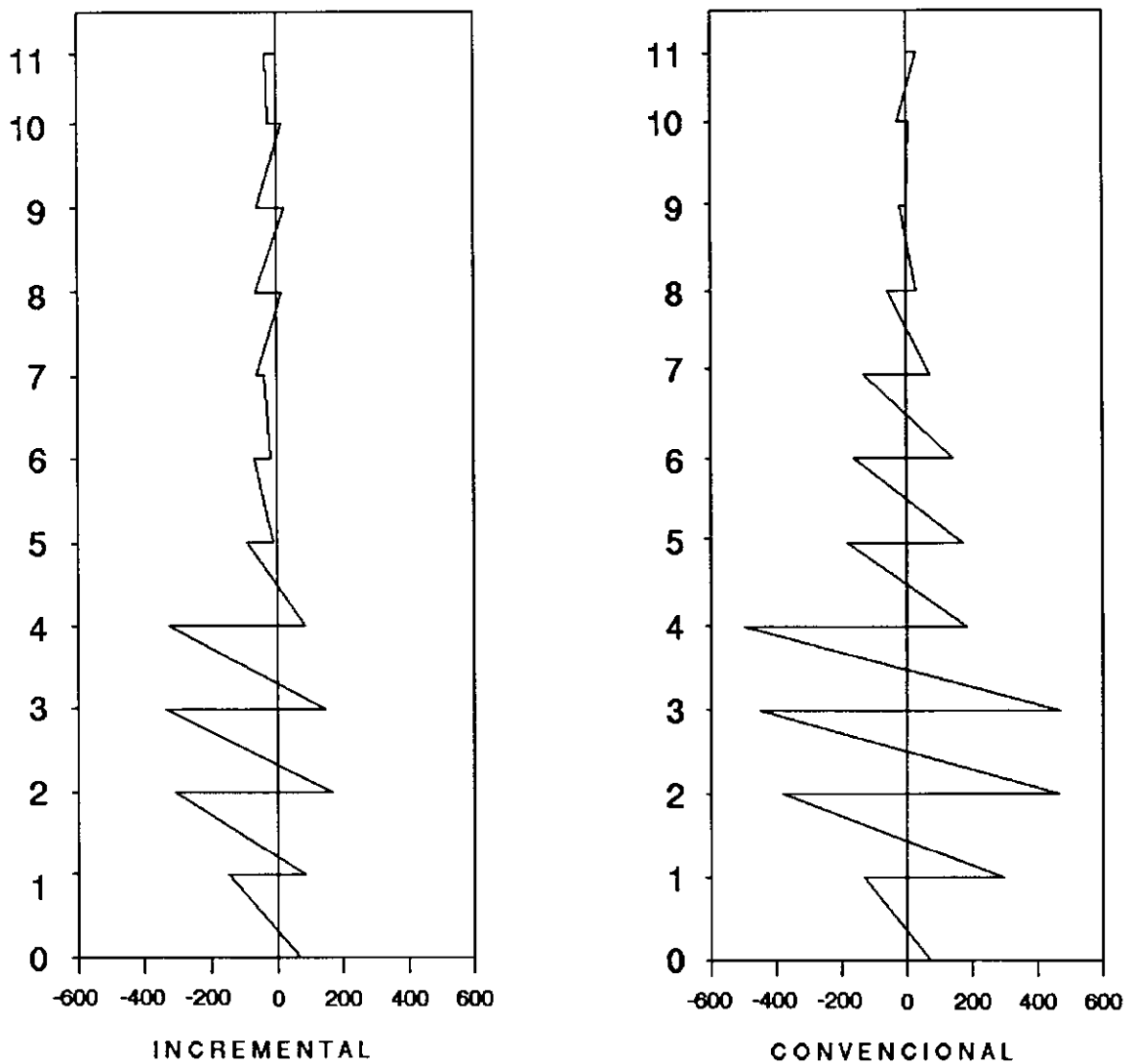


Figura V.14- Pilar P14 : Diagramas dos esforços de flexão (em Kgf.m)

Finalizando as comparações para este exemplo, apresentam-se na tabela (V.6) as reações de apoio da estrutura ao nível do terreno, na posição dos pilares P12. Os termos RH e RV referem-se às reações horizontais e verticais, respectivamente, enquanto MZ indica os momentos fletores em torno de um eixo perpendicular ao plano do pórtico. Através dos valores tabelados fica evidenciada a grande diferença entre uma e outra forma de análise, diferença esta que mostra-se relevante mesmo quando considerada a envoltória para as diversas combinações de carregamento. Neste exemplo as combinações efetuadas foram as mesmas do exemplo anterior. Agora, porém, o carregamento permanente é constituído das cargas de peso próprio somadas às de alvenaria e de revestimento.

tipo	max.Conv.	max.Incr.	$\frac{C-I}{C} \%$	min.Conv.	min.Incr.	$\frac{C-I}{C} \%$
RH	-646	-1139	-76.3	-74	-405	-447.
RV	100330	99040	1.3	66063	64769	2.0
MZ	1215	1558	-28.2	-367	-24	93.5

Tabela V.6 - Pilar P12 : Reações de apoio ao nível do terreno (em Kgf e m)

Antes da análise do quadro I já era possível prever-se a grande importância da análise incremental

construtiva para a correta determinação dos esforços, reações e deslocamentos para este exemplo. Esta afirmação é baseada na presença de um elemento de grandes dimensões da seção transversal (pilar P13), e que possui pequena deformação axial devido ao carregamento vertical, em relação aos demais elementos, visto que foi dimensionado predominantemente em função das ações horizontais. Se este elemento estivesse situado em uma das extremidades do pórtico, e portanto recebendo um carregamento vertical teoricamente menor, o deslocamento diferencial vertical em relação aos elementos adjacentes seria ainda maior.

Em relação à envoltória dos esforços, uma observação deve ser feita, de modo a facilitar a extensão dos resultados obtidos neste exemplo, para as demais estruturas. Apesar de ser constituído por apenas 11 andares, o quadro analisado apresentou um resultado razoável no que se refere ao objetivo de evidenciar a importância da análise pelo procedimento incremental. Apesar de ser uma edificação de pequena esbeltez, e portanto estar sujeita a ações não muito acentuadas devido ao efeito do vento, este teve grande relevância na envoltória dos esforços para a estrutura analisada. Este fato deve-se ao pequeno número de elementos resistentes de grande rigidez, o que faz com que o quadro I, que se encontra neste grupo, seja responsável pela absorção de grande parte dos esforços horizontais atuantes. Como as ações horizontais foram analisadas sempre como agindo após a construção, isto é, de forma não incremental, a



consideração das mesmas na análise foi fundamental para reduzir as diferenças nos resultados fornecidos pelos dois procedimentos de análise.

Ainda para o prédio em consideração, foi analisado um segundo quadro. As características deste quadro, além das comuns ao quadro I, anteriormente descritas, estão representadas na tabela (V.7) (características das seções transversais) e nas figuras (V.15) (geometria e carregamento devido ao vento) e (V.16) (demais carregamentos). Composição do carregamento vertical total:

- peso próprio da estrutura : 36,6 %
- alvenaria + revestimento : 46,4 %
- carga accidental : 16,9 %

elto	andar	dimensões	área	inércia
C1	1 - 11	,10 x ,58	0,058	0,0016259
V1	1 - 11	,10 x ,58	0,058	0,0016259
V2	1 - 11	,10 x ,58	0,058	0,0016259
V3	1 - 11	,10 x ,58	0,058	0,0016259
V4	1 - 11	,10 x ,58	0,058	0,0016259
C2	1	,15 x ,58	0,087	0,0024389
P1	1 - 6	,15 x ,40	0,060	0,0008000
	7 - 11	,15 x ,30	0,045	0,0003375
P5	1 - 3	,20 x ,70	0,140	0,0057167
	4 - 6	,20 x ,50	0,100	0,0020833
	7 - 11	,15 x ,40	0,060	0,0008000
P9	1 - 4	,30 x ,70	0,210	0,0085750
	5 - 7	,20 x ,60	0,120	0,0036000
	8 - 11	,15 x ,50	0,075	0,0015625
P12	1 - 4	,25 x ,60	0,150	0,0045000
	5 - 7	,20 x ,50	0,100	0,0020833
	8 - 11	,15 x ,40	0,060	0,0008000
P15	1 - 4	,20 x 1,0	0,200	0,0166667
	5 - 7	,20 x ,70	0,140	0,0057167
	8 - 11	,20 x ,50	0,100	0,0020833

Tabela V.7 - Quadro II : características das seções transversais (m)

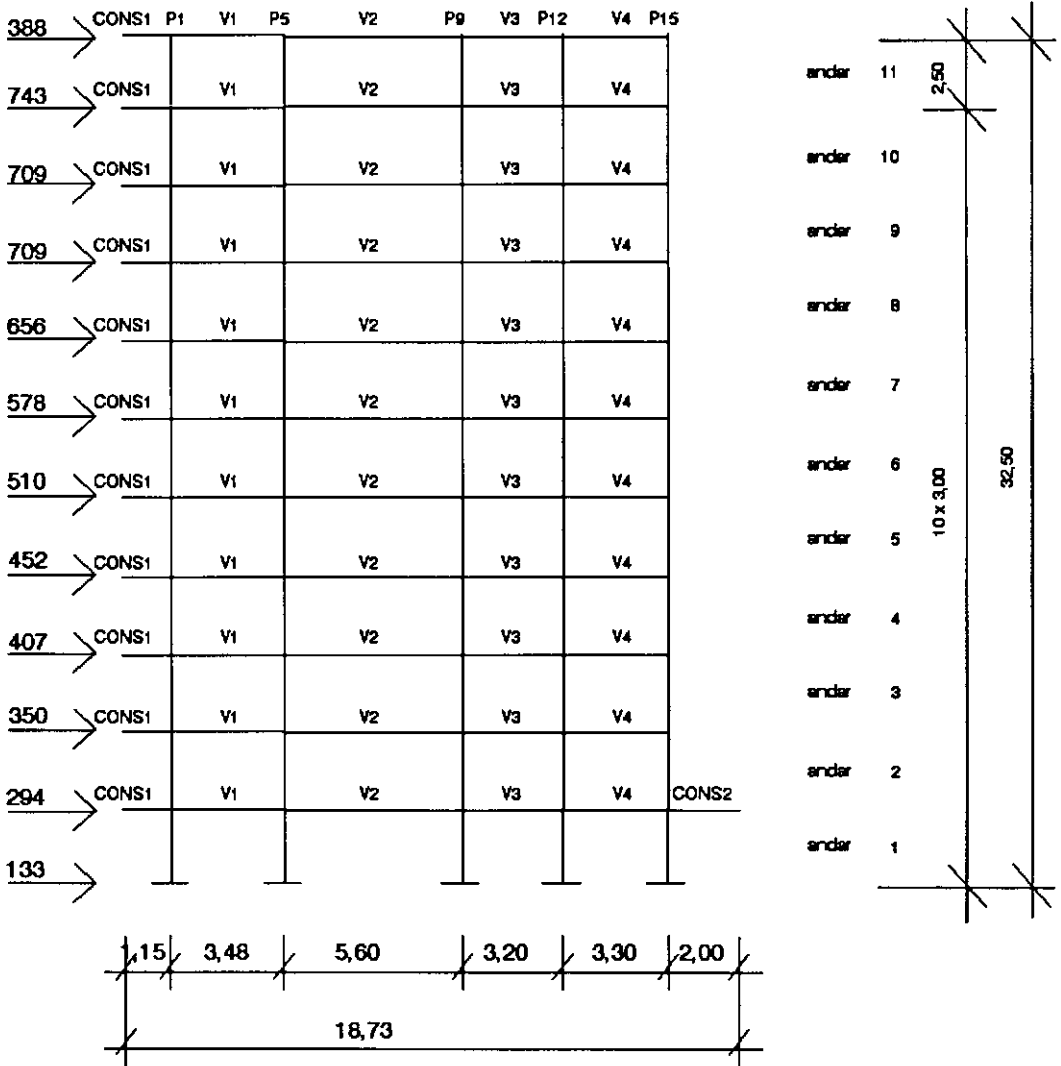
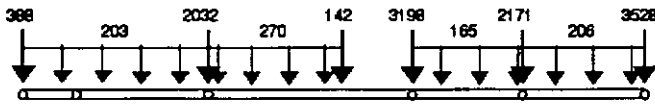
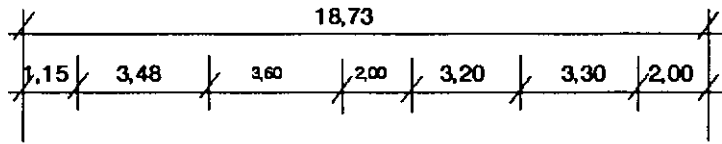
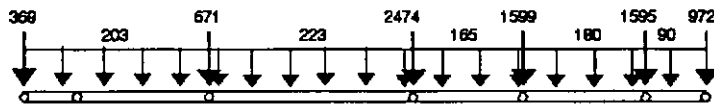


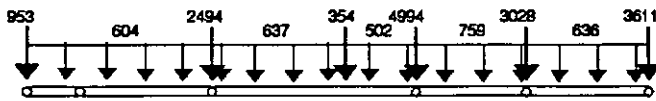
Figura V.15 - Quadro II : geometria e carga de vento  
(Kgf e m)



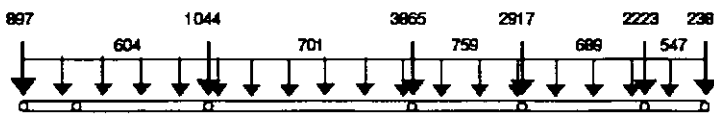
p.p. fora do plano:  
andares 2 a 11



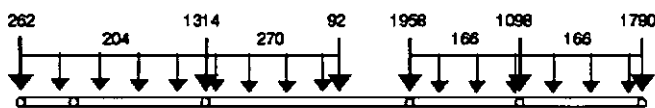
p.p. fora do plano:  
andar 1



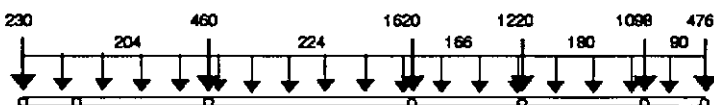
alvenaria+revestimento:  
andares 2 a 11



alvenaria+revestimento:  
andar 1



carga acidental:  
andares 2 a 11



carga acidental:  
andar 1

Figura V.16 - Quadro II : carregamentos verticais  
(Kgf e m)

As figuras (V.17) e (V.18) apresentam os deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares P9 e P12 e entre P12 e P15, respectivamente. Deste modo, a primeira refere-se diretamente aos apoios das vigas V3, e a segunda aos apoios das vigas V4.

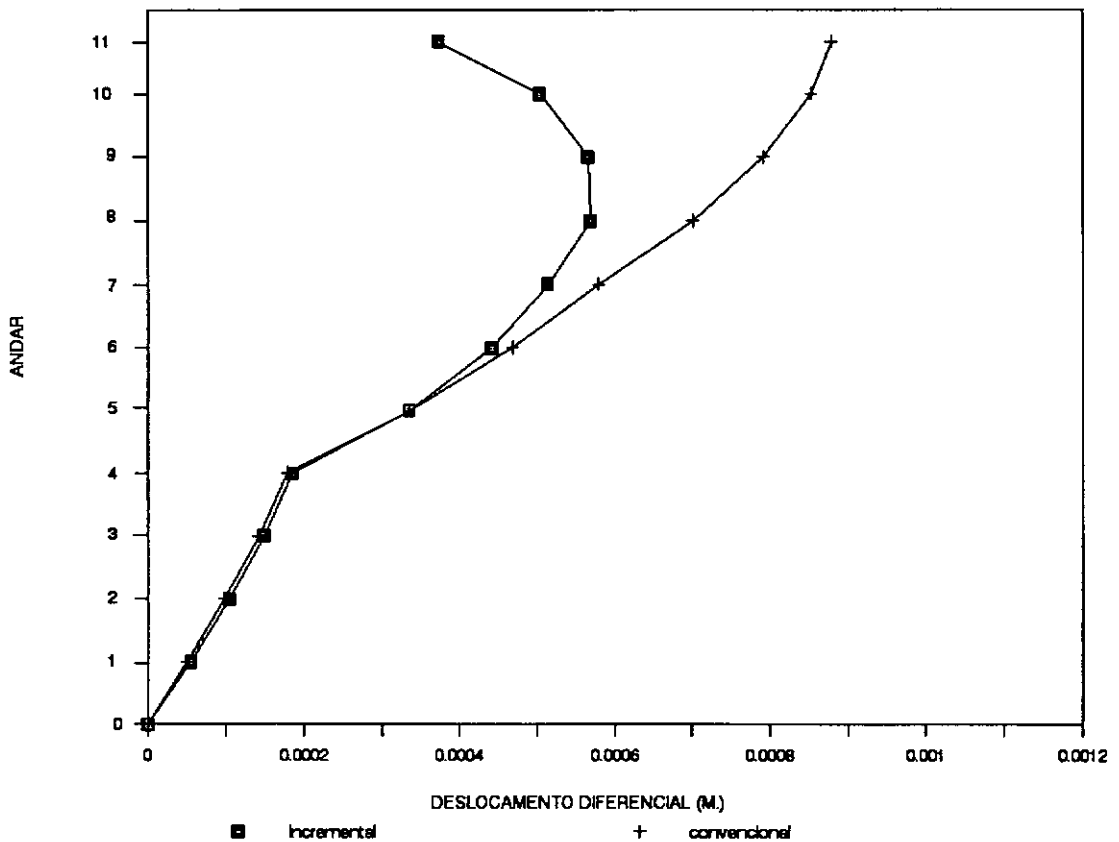


Figura V.17- Carregamento vertical permanente:  
deslocamento diferencial vertical P9-P12

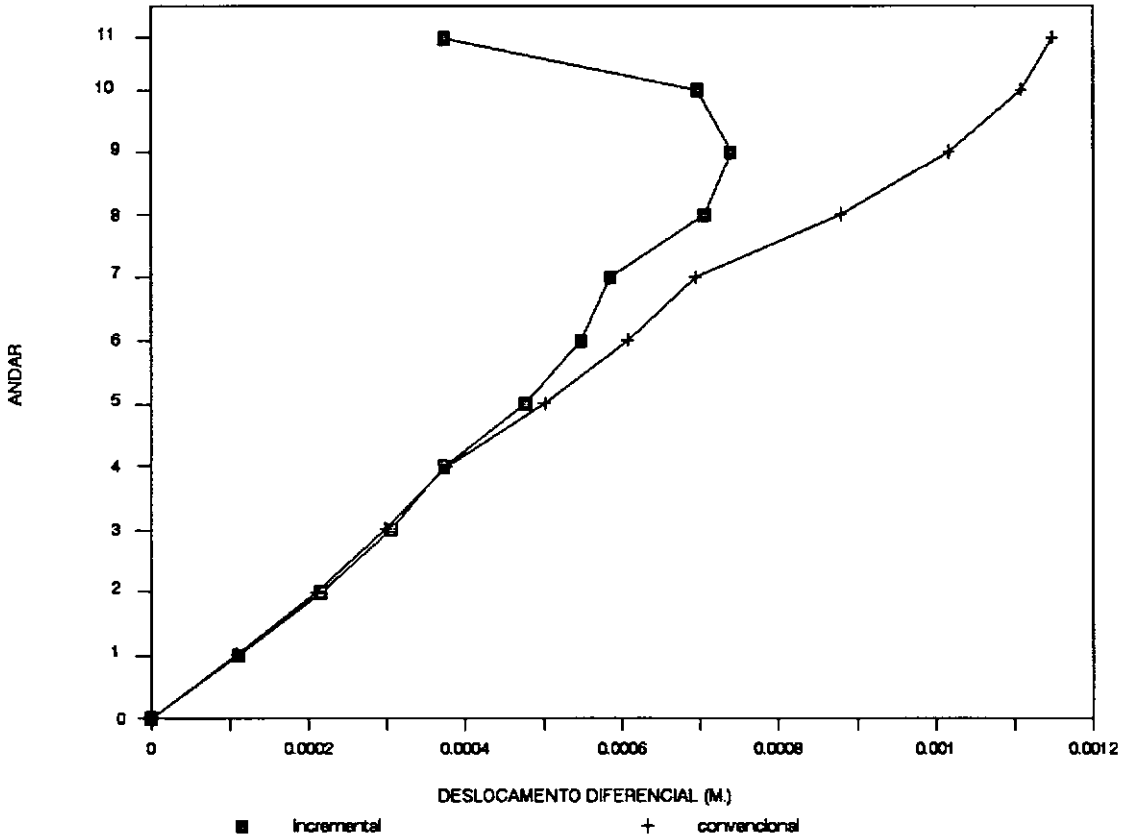


Figura V.18- Carregamento vertical permanente:  
deslocamento diferencial vertical P12-P15

Observa-se que, não apenas pelas relações entre as seções transversais dos pilares, como também pela posição de cada um no pórtico, o pilar P15 é o que está submetido à menor tensão normal devido às cargas verticais, e portanto apresentará maior diferença entre os esforços

obtidos pelo procedimento incremental e pelo procedimento convencional, em relação aos demais pilares. As tabelas (V.8) e (V.9) ilustram os momentos fletores nas vigas V3, ao longo da altura da edificação, mostrando que mesmo para os elementos mais centrais da estrutura essa diferença entre os esforços também é significativa.

and.	C perm.	I perm.	$\frac{C-I}{C} \%$	C vert.	I vert.	$\frac{C-I}{C} \%$
1	-1038	-1202	-15,8	-1174	-1339	-14,1
2	-1173	-1441	-22,8	-1310	-1577	-20,4
3	-1357	-1543	-13,7	-1520	-1706	-12,2
4	-1454	-1591	-9,4	-1629	-1765	-8,3
5	-1275	-1485	-16,5	-1406	-1617	-15,0
6	-1150	-1357	-18,0	-1246	-1453	-16,6
7	-1154	-1356	-17,5	-1258	-1459	-16,0
8	-1079	-1423	-31,9	-1175	-1519	-29,3
9	-996	-1425	-43,1	-1069	-1498	-40,1
10	-874	-1460	-67,0	-906	-1492	-64,7
11	-1163	-1594	-37,1	-1300	-1731	-33,2

Tabela V.8 - Viga V3 : Momentos na extremidade esquerda  
(em Kgf.m)

and.	C perm.	I perm.	$\frac{C-I}{C} \%$	C vert.	I vert.	$\frac{C-I}{C} \%$
1	-831	-924	-11,2	-994	-1087	-9,4
2	-687	-726	-5,7	-844	-884	-4,7
3	-503	-625	-24,2	-635	-757	-19,2
4	-445	-592	-33,0	-577	-724	-25,5
5	-634	-779	-22,9	-816	-961	-17,8
6	-725	-890	-22,8	-937	-1102	-17,6
7	-784	-929	-18,5	-1010	-1154	-14,3
8	-830	-929	-11,9	-1070	-1169	-9,3
9	-863	-913	-5,8	-1118	-1168	-4,5
10	-903	-868	3,9	-1177	-1142	3,0
11	-774	-805	-4,0	-1003	-1033	-3,0

Tabela V.9 - Viga V3 : Momentos na extremidade direita  
(em Kgf.m)

A tabela (V.10) mostra a influência dos esforços, desenvolvidos no pilar P12, durante as etapas intermediárias de construção e carregamento, para a determinação dos esforços extremos. A segunda e a terceira colunas apresentam a envoltória dos momentos fletores devidos aos carregamentos verticais, resultantes do procedimento incremental de análise, porém sem considerar os valores obtidos nas etapas intermediárias. As duas colunas seguintes apresentam a envoltória apenas para os esforços ocorridos durante a construção.



and.	Final max	Final min	Incr max	Incr min
1	233	188	315	197
2	-201	-198	-200	-16
3	-294	-242	-253	-71
4	-315	-256	-268	-98
5	-156	-139	-161	-76
6	9	8	8	-98
7	-25	-10	-141	-13
8	79	58	62	-46
9	169	132	139	11
10	193	138	149	44
11	169	100	114	103

Tabela V.10 - Pilar P12 : Momento inferior (Kgf.m)

and.	Final max	Final min	Incr max	Incr min
1	408	360	370	126
2	52	-1	10	-190
3	-74	-66	-199	-73
4	-218	-179	-311	-164
5	-68	-68	-230	-68
6	96	67	73	-184
7	23	21	21	-223
8	106	75	81	-129
9	163	118	127	-86
10	171	110	122	-54
11	107	36	50	30

Tabela V.11 - Pilar P12 : Momento superior (Kgf.m)

Das tabelas acima verifica-se que não apenas os esforços em alguns elementos ocorridos durante a construção superaram os esforços finais, como também que alguns apresentaram inversão em seu sentido. Este fenômeno provavelmente terá sua importância aumentada na medida em que o efeito das cargas horizontais seja considerado tanto nas etapas intermediárias como na obtenção das envoltórias dos esforços finais. A influência dos esforços obtidos com base nestas etapas intermediárias está ainda diretamente relacionada com a carga acidental considerada como atuando durante a construção, bem como com a simulação do efeito do escoramento.

Apresenta-se a seguir uma comparação entre os momentos fletores, para o pilar P12, com e sem a simulação do escoramento. A exemplo do procedimento anteriormente adotado, a simulação do escoramento foi efetuada considerando-se o andar escorado como transmitindo seu carregamento integralmente para o andar imediatamente inferior. A tabela (V.12) considera apenas os esforços finais. A segunda e a terceira colunas estabelecem a relação entre os momentos obtidos da análise convencional com os obtidos da análise incremental com simulação do escoramento, para o carregamento de caráter incremental. Na segunda coluna aparecem os momentos inferiores, e na terceira os superiores. Já a quarta e a quinta colunas repetem o mesmo procedimento, porém para a análise incremental sem simulação do escoramento.

and.	com escoramento		sem escoramento	
	M inf.	M sup.	M inf.	M sup.
1	-157.7	-51.2	-191.9	-67.2
2	-79.5	*	-105.4	36.2
3	26.2	36.4	18.6	-309.1
4	30.8	24.5	15.1	14.3
5	10.3	-44.7	5.8	-6.4
6	*	17.3	59.7	-3.7
7	89.9	*	37.4	*
8	17.1	40.9	30.0	28.3
9	10.8	39.8	28.4	34.7
10	41.5	59.7	46.2	49.1
11	66.9	88.6	74.2	86.1

Tabela V.12 - Pilar P12 : Momentos fletores com e sem simulação do escoramento

Por intermédio dos exemplos anteriores foi possível a verificação da ocorrência de diferenças significativas entre o procedimento convencional de análise e o procedimento incremental, com ou sem simulação do escoramento. A tabela acima nos permite a confirmação destas diferenças para uma mesma estrutura. Observa-se ainda, por analogia, a grande variação entre os esforços fornecidos pela análise incremental conforme se considere ou não o efeito do escoramento. A não consideração do mesmo, ou a consideração da forma aqui efetuada,

representam as duas formas extremas de se incluir este efeito na análise. A situação que melhor o reproduz situa-se entre esses dois extremos.

#### V.4 - EDIFÍCIO 3

O exemplo a seguir apresentado consiste em um pórtico intermediário pertencente à estrutura simples mostrada na figura (V.19). O carregamento considerado foi apenas o de peso próprio, também indicado na figura (para peso dos elementos contidos fora do plano do pórtico). Foram efetuadas análises para três diferentes seções dos pilares, de modo a verificar a variação dos esforços obtidos, também em função das relações entre as rigidezes.

Características elásticas do material:

-Módulo de elasticidade longitudinal:

$$E = 257.000 \text{ Kgf/cm}^2 \text{ (25.700 MPa)}$$

-Módulo de elasticidade transversal:

$$G = 0$$

Características das seções transversais:

-Área da seção transversal das vigas:

$$A_v = 0,08 \text{ m}^2$$

-Inércia das vigas:

$$I_v = 0,00107 \text{ m}^4$$

-Área da seção transversal dos pilares:

$$\text{Para } A_p < A_v : \quad A_p = 0,06 \text{ m}^2$$

$$\text{Para } A_p = A_v : \quad A_p = 0,08 \text{ m}^2$$

$$\text{Para } A_p > A_v : \quad A_p = 0,10 \text{ m}^2$$

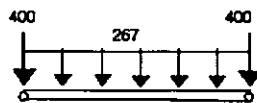
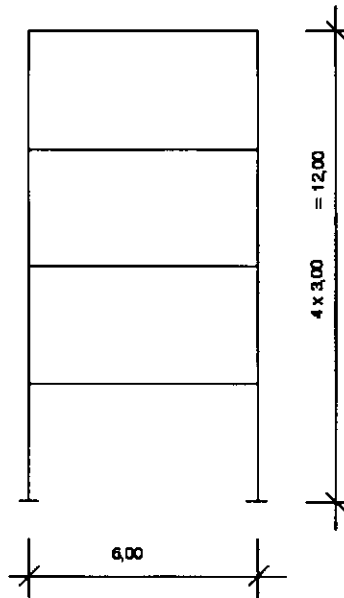
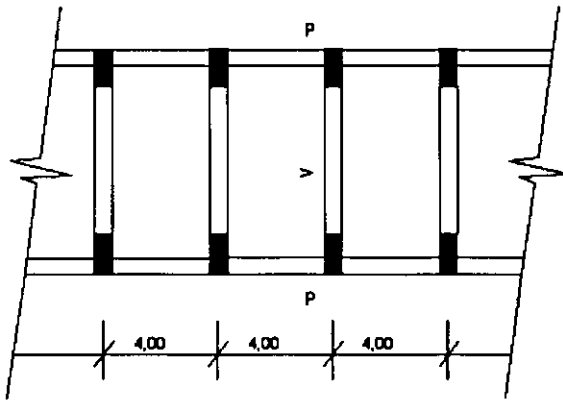
-Inércia dos pilares:

$$\text{Para } A_p < A_v : \quad I_p = 0,00045 \text{ m}^4$$

$$\text{Para } A_p < A_v : \quad I_p = 0,00107 \text{ m}^4$$

$$\text{Para } A_p < A_v : \quad I_p = 0,00208 \text{ m}^4$$

Nas figuras (V.20), (V.21) e (V.22) aparece a razão entre os momentos fletores desenvolvidos no quadro, obtidos tanto pelo procedimento convencional de análise como pelo procedimento incremental. Não foi simulado o efeito do escoramento, e o peso próprio dos elementos contidos no plano do pórtico foi computado de maneira automática.



p.p. fora do plano:  
andar tipo

Figura V.19- Edifício 3 : pavimento tipo, pórtico intermediário e carregamento (Kgf e m)

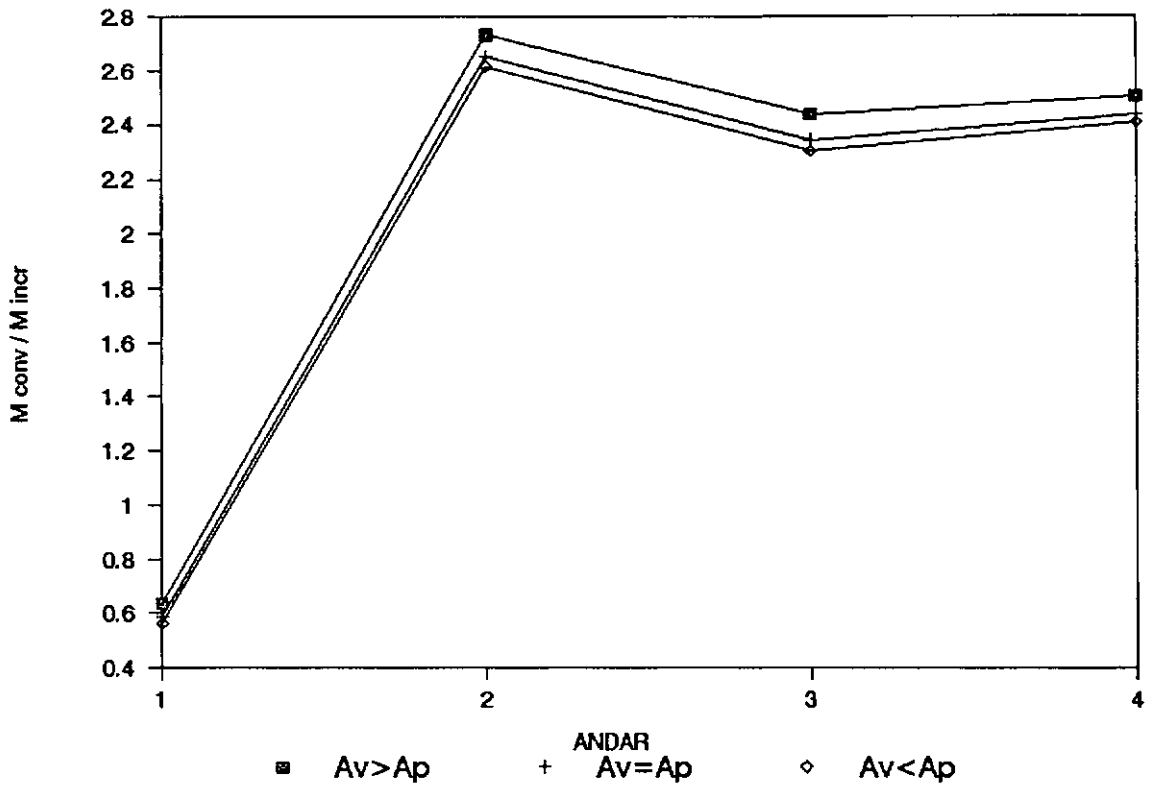


Figura V.20 - Pilares : Momento inferior

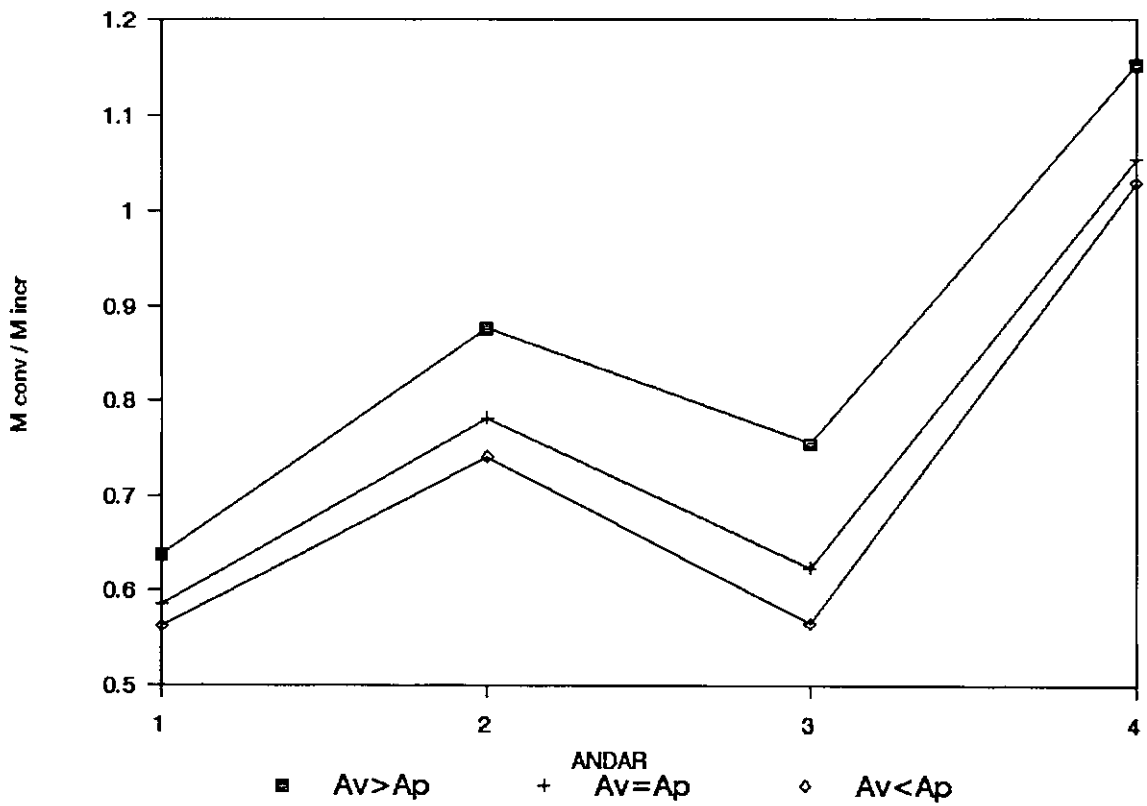


Figura V.21 - Pilares : Momento superior

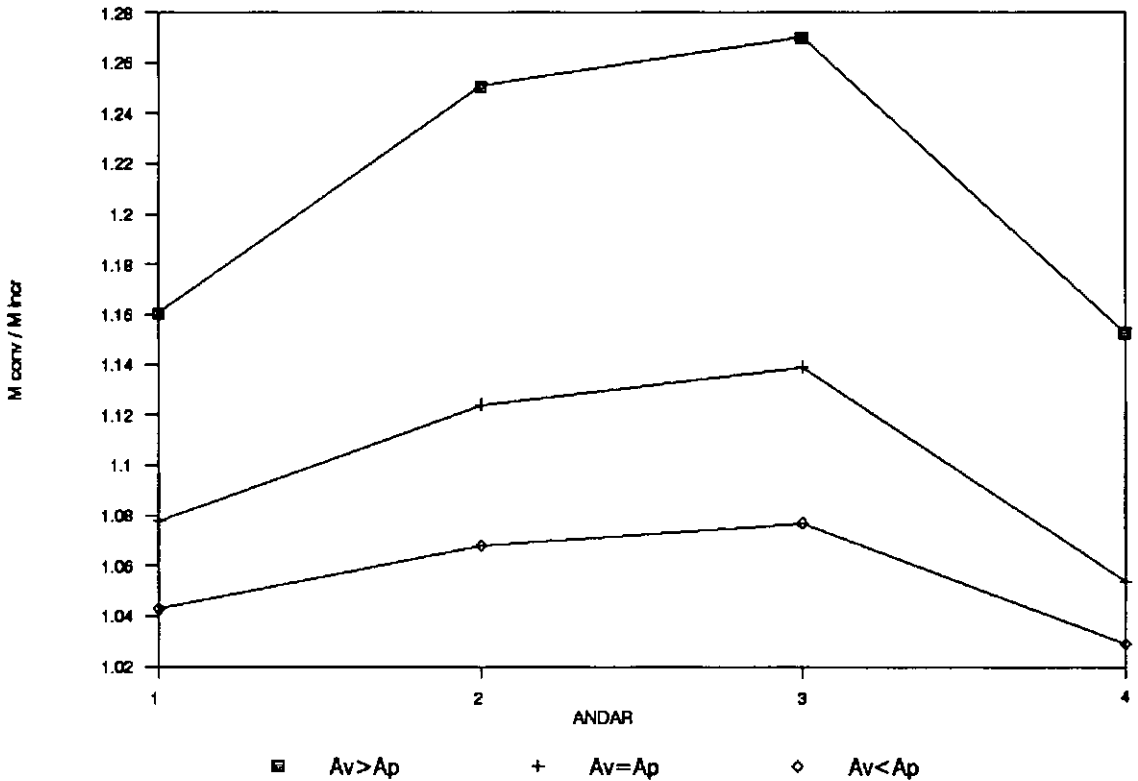


Figura V.22 - Vigas : Momentos nos apoios

Através dos diagramas observa-se a grande discrepância entre os resultados obtidos pelos dois procedimentos de análise. Chama-se a atenção não apenas para o fato do pórtico pertencer a uma estrutura de pequeno porte, como também para a não existência de deslocamentos diferenciais entre os pilares, devido à simetria tanto de geometria como de carregamento. A pequena altura da edificação implica ainda em inércia das vigas significativa em relação à dos pilares, o que faz com que as primeiras sejam também bastante influenciadas pelo procedimento utilizado. Nota-se que a variação na relação entre as



dimensões dos elementos acarreta em grandes variações também na relação entre os resultados obtidos pelos dois procedimentos de análise. Contudo, a necessidade da análise incremental para as três estruturas apresentadas nas figuras se evidencia pelo fato da relação entre os esforços variar no sentido de resultados mais conservativos em alguns tipos de esforços, e no sentido inverso para outros tipos.

#### V.5 - EDIFÍCIO 4

O quarto edifício analisado possui 36 andares, tendo finalidade residencial. Para a determinação do carregamento lateral este edifício foi suposto como localizado no Rio de Janeiro. A figura (V.23) apresenta um croqui do pavimento tipo, juntamente com um quadro intermediário, escolhido para a análise, e os carregamentos aplicados a este (não inclui o peso próprio do quadro, que foi computado de forma automática).

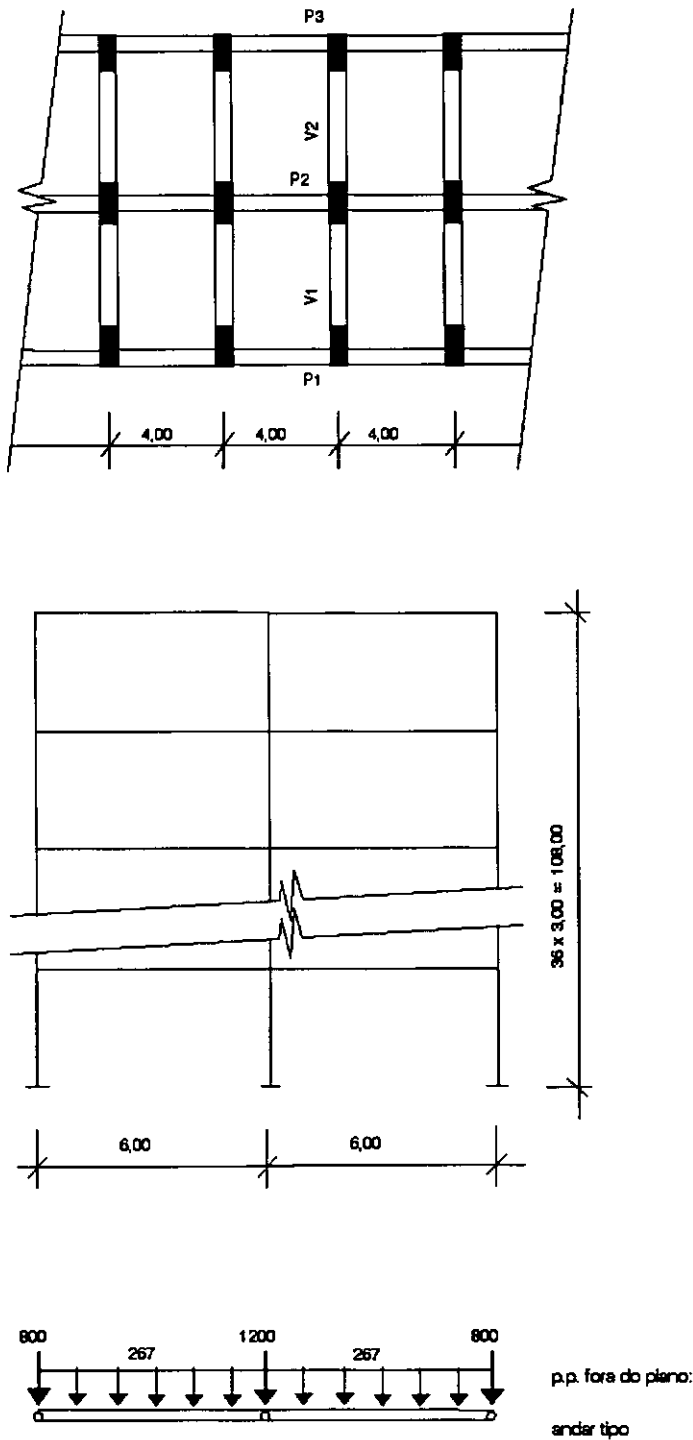


Figura V.23- Edifício 4 : pavimento tipo, quadro  
selecionado e carregamentos (Kgf e m)

Na tabela (V.13) estão definidas as características geométricas do referido quadro. Devido à simetria foram omitidas as vigas V2 e os pilares P3.

elto	andar	dimensões	área	inércia
V1	1 - 36	,20 x ,80	0,160	0,008533
P1	1 - 12	,30 x 1,3	0,390	0,054925
	13 - 24	,30 x 1,0	0,300	0,025000
	25 - 36	,30 x ,50	0,150	0,003125
P2	1 - 12	,30 x 2,0	0,600	0,200000
	13 - 24	,30x 1,25	0,375	0,048828
	25 - 36	,30 x ,60	0,180	0,005400

Tabela V.13 - características das seções transversais  
(em m)

Além das citadas, a análise envolveu ainda as seguintes considerações:

-Características elásticas do material:

-Módulo de elasticidade longitudinal:

$$E = 270.000 \text{ Kgf/cm}^2 \text{ (27.000 MPa)}$$

-Módulo de elasticidade transversal:

$$G = 112.000 \text{ Kgf/cm}^2 \text{ (11.200 MPa)}$$

-O peso específico considerado foi de 2500 Kgf/m<sup>3</sup>;

-Foi incluída na análise a deformação devido ao esforço cortante;

-Não foi simulado o efeito do escoramento. Não foi considerado o caráter incremental da alvenaria e do revestimento, bem como qualquer carga acidental de construção.

As figuras (V.24) e (V.25) apresentam os momentos fletores nas vigas, para o carregamento de peso próprio, obtidos pela análise incremental e pela análise convencional.

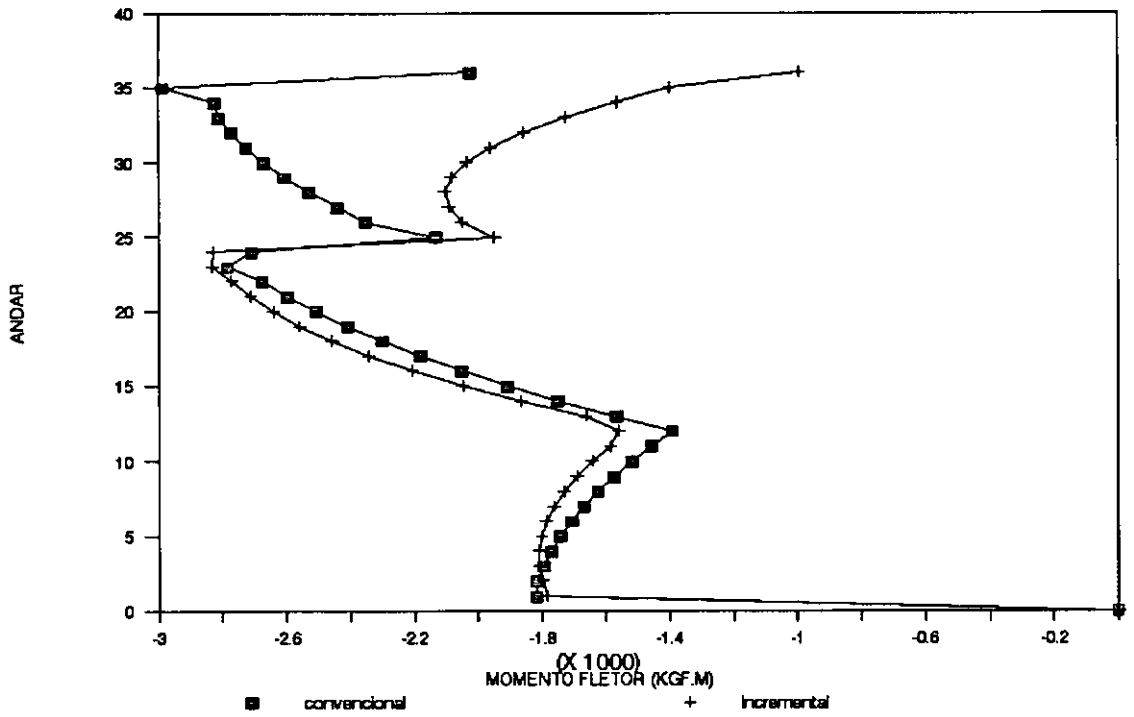


Figura V.24 - Vigas : momentos fletores sobre o apoio da esquerda

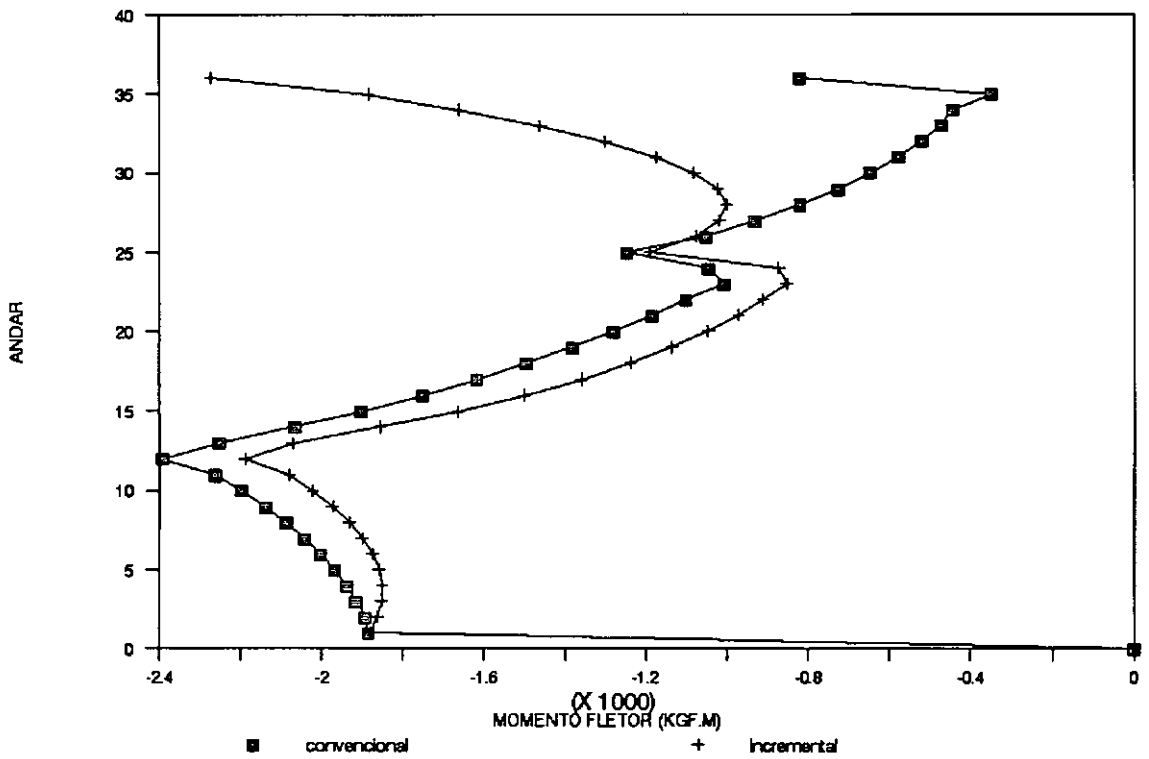


Figura V.25- Vigas : momentos fletores sobre o apoio da direita

Observa-se que, de acordo com a análise convencional, a tendência dos momentos na viga sobre o apoio intermediário (apoio direito) é a de apresentarem inversão em seu sentido, na medida em que novamente há superestimação dos deslocamentos diferenciais entre este apoio e os apoios extremos. Desse modo, o aumento relativo dos esforços no apoio intermediário é acompanhado de uma redução dos mesmos no outro apoio.

Como anteriormente citado, a análise incremental pode ser efetuada com incremento diferente da unidade, ou seja, computando-se mais de um andar ou estágio de carregamento por etapa de análise. Para o presente exemplo foi efetuada a comparação entre os esforços resultantes da análise para diferentes incrementos. Como foi considerado apenas o carregamento de peso próprio como tendo caráter incremental, o número de estágios de carregamento neste caso é igual ao número de andares. A estrutura foi analisada para grupos de um estágio de carregamento ( 36 análises), grupos de 2 estágios (18 análises), 3 estágios (12 análises), 4, 6, 8, 9, 12, 18 ,24 e 36 estágios (este último nada mais é do que o procedimento convencional de análise). Nos casos em que a divisão do número de estágios de carregamento pelo número de grupos não resulta em um número inteiro, o grupo de menor tamanho (o resto da divisão) foi composto dos andares mais inferiores. As figuras (V.26) e (V.27) efetuam a comparação entre os resultados fornecidos para grupos de dois ou mais estágios (g maior ou igual a 2) com os fornecidos para grupos de

apenas um estágio ( $g$  igual a 1), que de acordo com a teoria exposta representam com exatidão o comportamento da estrutura. Estas figuras referem-se aos momentos fletores nas vigas, apenas para o último andar do pórtico.

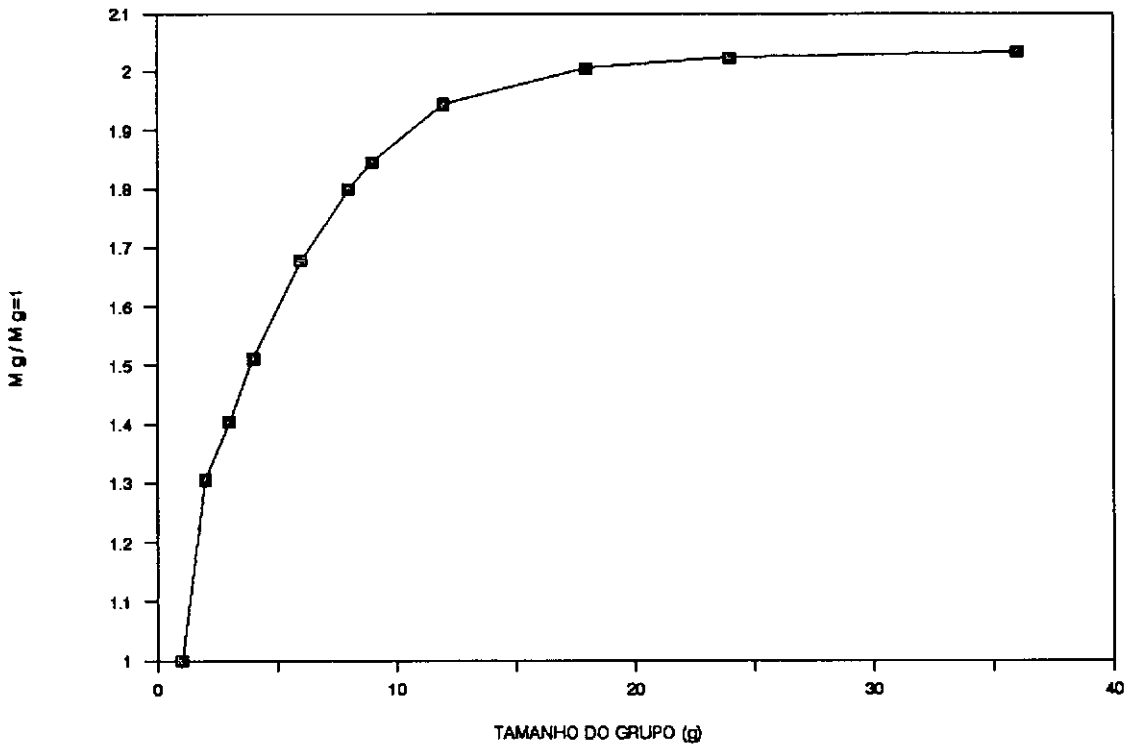


Figura V.26- Viga do último andar : momento fletor sobre o apoio da esquerda

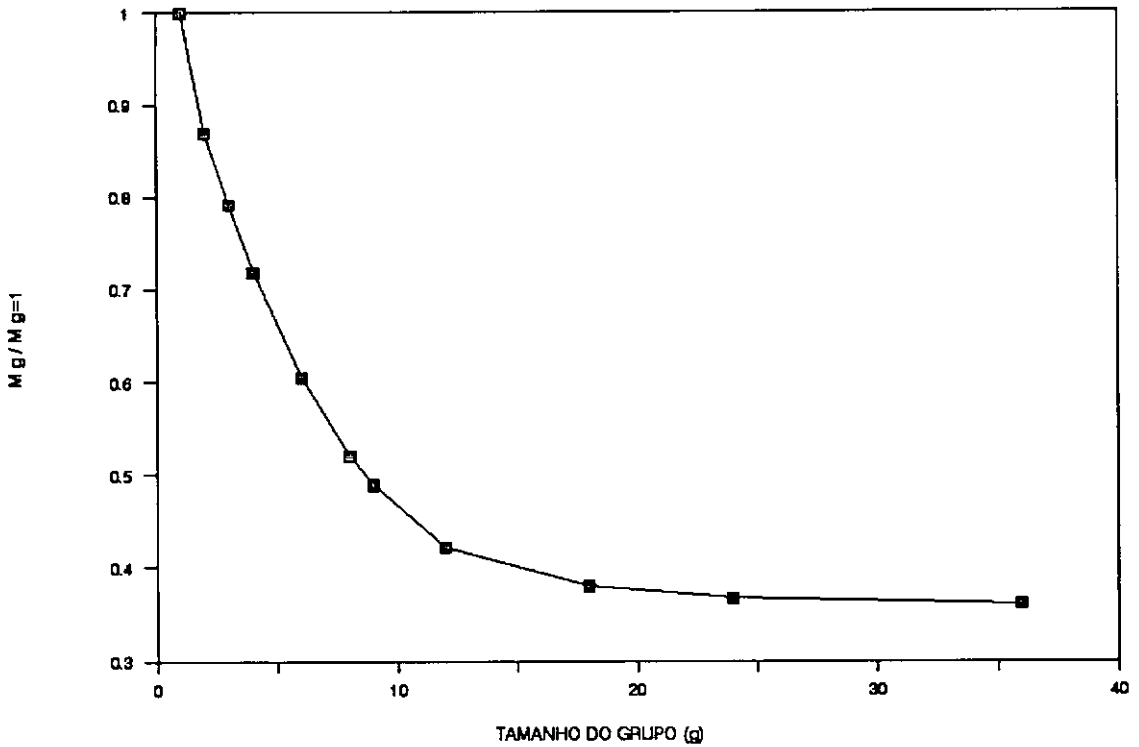


Figura V.27- Viga do último andar : momento fletor sobre o apoio da direita

Observa-se que para o último andar da edificação as curvas apresentam um comportamento regular, ou seja, existe uma relação entre o tamanho do grupo e o afastamento verificado entre o esforço obtido para este tamanho de grupo e o valor exato do esforço. Aparentemente, os pontos que são função de tamanhos de grupo que não dividem o número de estágios de carregamento de forma exata (no caso, 8 e 24) não parecem ter alterado essa regularidade das curvas. Por intermédio das figuras acima verifica-se,



porém, como os valores obtidos para qualquer  $g$  vão rapidamente se afastando do resultado exato ( $g$  igual a 1), sendo que já quando se analisa dois estágios de carregamento são obtidas diferenças superiores a 30% para o momento sobre o apoio esquerdo. Além disso, a variação regular obtida para o último andar não ocorre para os andares intermediários, como evidencia a figura (V.28) em relação aos andares 12 e 13. Isto se deve ao fato da análise para  $g$  diferente da unidade efetuar a combinação entre a análise incremental exata, entre um e outro grupo, e a análise convencional, dentro de cada grupo (figura (V.29)). Desse modo são verificados grandes distúrbios, principalmente nos andares de transição entre os diferentes grupos.

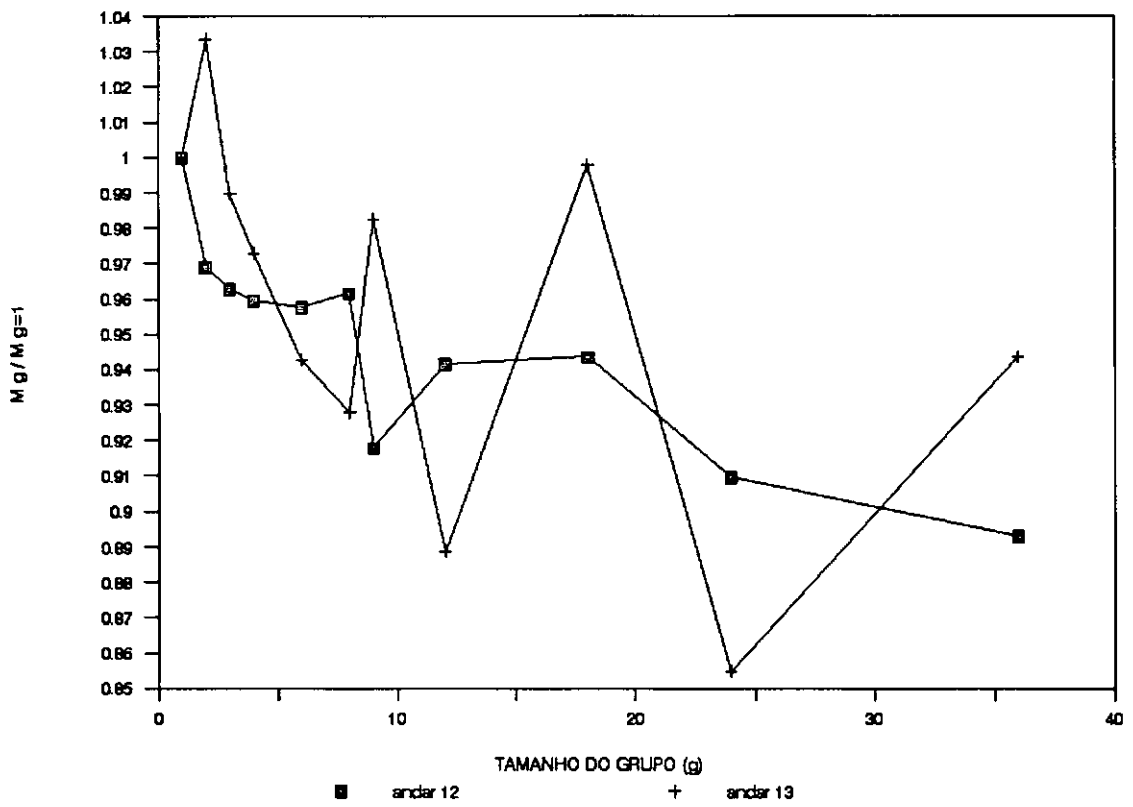


Figura V.28- Vigas dos andares 12 e 13 : momentos fletores sobre o apoio da esquerda

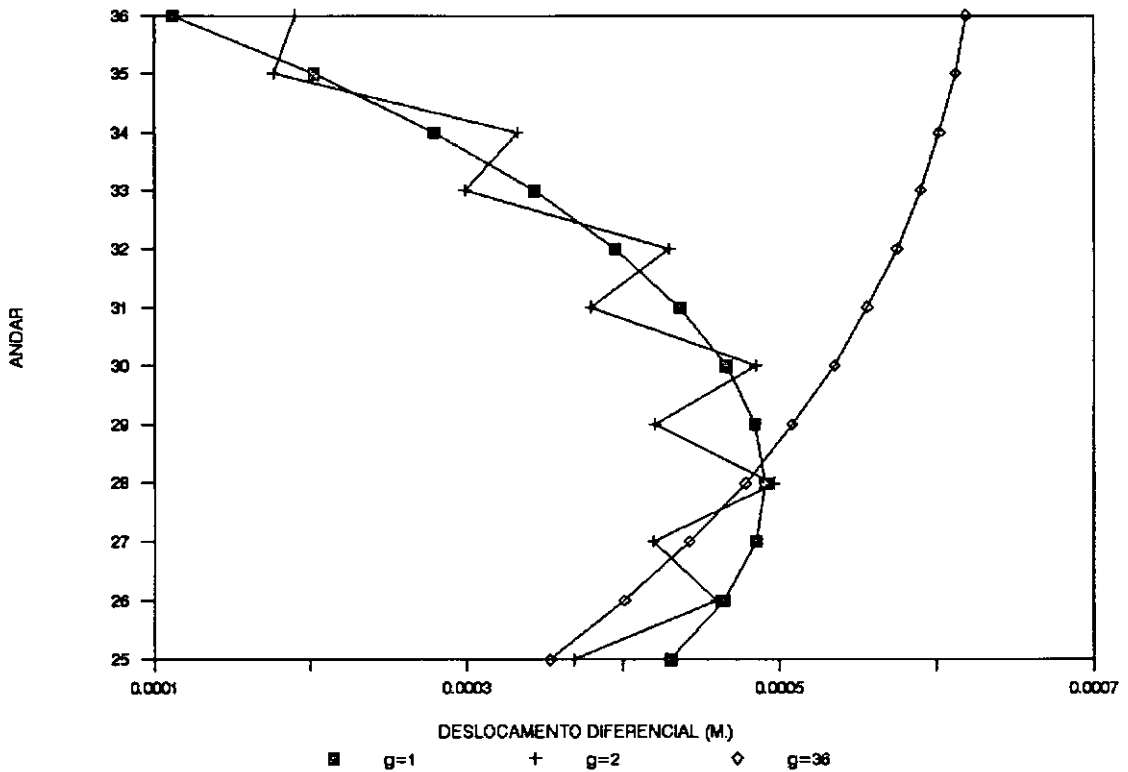


Figura V.29 - Deslocamentos diferenciais verticais  
para  $g=1$ ,  $g=2$  e  $g=36$

A primeira vista da figura anterior sugere que um ajuste da curva fornecida para os deslocamentos do grupo de tamanho igual a 2 poderia permitir uma correção dos esforços obtidos. Convém lembrar, porém, que as linhas da figura foram obtidas pela superposição dos deslocamentos diferenciais obtidos em cada etapa da análise, tendo portanto caráter meramente ilustrativo. Os deslocamentos obtidos em cada etapa da análise é que efetivamente serão usados para o cálculo dos esforços. Estes deslocamentos, porém, não podem ser avaliados a partir de um único gráfico, como o apresentado.

A relação entre o aumento do tamanho do grupo e a redução do tempo de processamento da análise não foi estudada por ser função fundamentalmente do programa utilizado, e portanto não permitir qualquer tipo de generalização. Tem-se porém que esse fator não deve ser considerado quando da definição do tamanho do grupo, já que mesmo uma substancial redução no tempo de processamento não justificaria as eventuais distorções resultantes.

## CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

## VI.1 - IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE INCREMENTAL

Com base nos exemplos anteriores pode-se, sem perda de generalidade, afirmar a grande necessidade da análise incremental para a correta determinação dos esforços solicitantes em edificações. Foram efetuadas análises de estruturas de diferentes números de andares, com dimensões e formas variadas, com ou sem deslocamentos diferenciais verticais entre os pilares. Em todas estas estruturas verificou-se grande diferença entre os resultados obtidos por intermédio da análise incremental construtiva em comparação com os gerados pelo procedimento convencional de análise.

Em relação aos deslocamentos diferenciais verticais entre nós adjacentes contidos em um mesmo andar, pode-se afirmar que estes deslocamentos, quando ocorrem, são informação segura de que se verificam também grandes diferenças entre os esforços fornecidos pelos dois procedimentos estudados. O procedimento convencional de análise, por acumular nos andares superiores da edificação

deslocamentos inexistentes, faz com que o deslocamento diferencial cresça ao longo da altura da edificação, atingindo seu valor máximo no topo desta. Já para o procedimento incremental, os deslocamentos diferenciais máximos se verificam aproximadamente à meia altura da edificação (ou do trecho sem variação nas características de seus elementos). Os deslocamentos diferenciais horizontais entre nós de um mesmo andar, bem como as rotações destes nós, aparentemente não apresentam um comportamento que permita generalização.

A existência de deslocamentos diferenciais verticais acentua as diferenças entre os dois procedimentos de análise, porém não é condição necessária para que tal diferença ocorra. Como ficou demonstrado no estudo do edifício 3, a superestimação dos deslocamentos nodais pelo procedimento convencional de análise acarreta em um grande erro na determinação dos esforços seccionais, mesmo quando não há deslocamentos diferenciais. O ponto de momento nulo nos pilares, obtido por intermédio do procedimento convencional, situa-se aproximadamente no meio dos mesmos (os momentos superior e inferior são aproximadamente iguais), enquanto pelo procedimento incremental este ponto passa a situar-se a cerca de um quarto da altura de cada pilar (o momento superior é aproximadamente o triplo do inferior). Como o dimensionamento dos pilares é feito predominantemente em função do maior momento fletor em cada pilar, evidencia-se uma situação contrária à segurança para os valores fornecidos pelo procedimento convencional. Sem

deslocamentos diferenciais verticais dos nós adjacentes não haverá redistribuição dos esforços normais em cada pilar, bem como os momentos fletores em cada extremo da viga que une estes pilares apresentarão variação de mesmo sinal.

Outra observação importante é que a análise incremental é importante independentemente do número de andares da edificação. Esta afirmação baseia-se no fato de que em estruturas de pouca altura, apesar do carregamento permanente ter sua influência reduzida em relação ao carregamento vertical total (elementos de menor seção transversal), é menos importante a consideração do efeito de cargas laterais, efeito este que reduz a diferença entre os esforços fornecidos por cada um dos procedimentos, quando se considera a envoltória destes esforços.

## VI.2 - CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

Verificada a importância da análise incremental construtiva no estudo de edificações, as estruturas analisadas permitiram ainda que se examinasse a influência de outros fatores, que visam por um lado reproduzir com mais fidelidade o comportamento real de uma estrutura, e por outro efetuar uma análise mais expedita. Estes fatores são, entre outros, os esforços ocorridos durante a construção, a simulação do efeito do escoramento e a redução do número de etapas de análise.

Como anteriormente citado, a análise incremental

oferece uma possibilidade adicional que é a de se poder acompanhar o comportamento da estrutura ao longo de toda a sua construção. Observou-se que os esforços seccionais ocorridos durante esta fase podem superar os esforços finais, isto é, aqueles que surgem durante a ocupação da estrutura já para a finalidade para a qual foi idealizada. Durante alguma etapa intermediária, os esforços desenvolvidos em alguns elementos podem inclusive apresentar troca de sinal em relação aos esforços finais. Concluiu-se, então, que a pesquisa dos esforços intermediários deve sempre ser efetuada, sendo que sua importância aumenta na medida em que se considere ainda outros efeitos durante a construção, como a presença de uma parcela da carga acidental devida ao trânsito de operários ou estocagem de materiais, ou ainda a consideração do efeito do vento.

A simulação ou não do efeito do escoramento representa outro fator de relevante influência nos esforços ocorridos durante alguma etapa intermediária. Além disso, foi demonstrada sua importância também na determinação dos esforços finais. Efetuando-se a comparação entre os esforços obtidos com e sem essa simulação, verificaram-se grandes diferenças que evidenciam a necessidade da inclusão do efeito do escoramento na análise, para uma melhor determinação dos esforços solicitantes.

Com o intuito de reduzir o esforço computacional, foi experimentada a análise da estrutura pela divisão, em



função do número de estágios de carregamento, em grupos de tamanho variando de um único estágio de carregamento (que representa a forma "exata" de análise incremental) até um único grupo contendo todos os estágios de carregamento (que reproduz a análise convencional). Verificou-se, porém, que na medida em que o tamanho deste grupo aumenta, os resultados obtidos vão se afastando rapidamente dos resultados exatos. Além disso, este afastamento não se dá de forma regular para os andares intermediários da estrutura, verificando-se distúrbios principalmente nos andares que marcam a transição entre diferentes grupos. Desta forma, para um determinado esforço de um determinado andar, nada se pode afirmar sobre seu comportamento baseando-se unicamente no tamanho do grupo. Concluiu-se, então, que a análise pela consideração de mais de um estágio de carregamento por vez não apresenta resultados satisfatórios, só sendo justificado este procedimento quando reproduzir as reais condições de carregamento ou construção.

### VI.3 - SUGESTÕES PARA FUTURAS IMPLEMENTAÇÕES COMPUTACIONAIS

Objetivando um futuro aprofundamento no tema em estudo, apresentam-se a seguir algumas sugestões, relativas ao aspecto computacional, que não foram incluídas no programa desenvolvido no presente trabalho. São elas:

-A análise incremental construtiva de estruturas tridimensionais considerando o efeito das lajes

como diafragmas;

-Nos exemplos estudados foi feita a consideração de que o andar escorado apoia-se unicamente no andar que lhe é imediatamente inferior. Este procedimento por vezes pode não reproduzir o comportamento real do escoramento, já que a carga do andar escorado deve ser distribuída por andares de concretagem menos recente, e que portanto já tenham adquirido sua resistência mínima prevista em projeto. O número de andares componentes do sistema de escoramento varia, portanto, principalmente com a velocidade de construção da estrutura. É importante que se inclua no programa a possibilidade de variar este número de andares, bem como variar as características elásticas do material que, são função da resistência. Sugere-se, ainda, a inclusão no programa da possibilidade de simulação de outros sistemas de escoramento;

-A consideração do efeito da fluência e da retração dentro do procedimento construtivo incremental, analisando a importância destes nos resultados finais;

-A consideração do efeito do vento durante as etapas intermediárias de construção e de carregamento acarreta em considerável trabalho adicional, já que implica em um número adicional de análises igual ao número total de etapas de construção da estrutura. Implementar a consideração deste efeito e verificar sua relevância em função do esforço computacional adicional;

-Observou-se que a consideração de parte da carga accidental como atuando durante a construção altera sensivelmente os esforços seccionais finais, além de aumentar a influência dos esforços obtidos nas etapas intermediárias quando se efetua a pesquisa dos esforços extremos. É de interesse que os valores para estas cargas sejam convenientemente estipulados, a exemplo do que já ocorre para as cargas accidentais de ocupação;

-A aplicação do procedimento incremental construtivo considerando-se a não linearidade geométrica deve, a exemplo da análise incremental construtiva linear, implicar em diferenças significativas de resultados em relação ao procedimento convencional. Sugere-se o desenvolvimento de um programa para análise incremental construtiva não linear.

## APÊNDICE 1

MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA ACON

## 0.OBSERVAÇÕES INICIAIS

0.1.0 arquivo de dados é criado com a utilização de um editor de texto. O nome deste arquivo deve ter no máximo 8 caracteres, e opcionalmente pode ter extensão (máximo de 3 caracteres).

0.2.Na definição dos formatos de entrada foi adotada a seguinte convenção:

- I = valor inteiro;
- R = valor real;
- () = pode ser omitido caso seja nulo.

Quando uma linha contiver mais de uma informação, estas devem obrigatoriamente estar separadas por vírgulas.

0.3.0 sistema de referência adotado é o usual em análise matricial, estando a estrutura contida no plano XY. O eixo local x coincide com o eixo principal do elemento, tendo seu sentido positivo quando se percorre este eixo da

esquerda para a direita nos elementos tipo viga e de baixo para cima para elementos tipo coluna. O eixo local y situa-se perpendicularmente ao eixo local x, a partir de uma rotação deste no sentido anti-horário. No sistema global o eixo Y aponta no sentido contrário ao da gravidade, sendo o eixo perpendicular X positivo quando aponta da esquerda para a direita.

#### ENTRADA DE DADOS:

### 1.CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ESTRUTURA

#### 1.1.Título do problema

Deve ocupar apenas uma linha (80 caracteres).

#### 1.2.Número de tipos de materiais e número de tipos de características geométricas.

Formato: I,I

#### 1.3.Número de andares da edificação e número de estágios de carregamento a analisar simultaneamente.

Por "andar" entende-se um ou mais nós de mesma coordenada global Y ,incluindo os elementos que unem estes nós entre si ou com os nós de coordenada global Y imediatamente inferior.

Formato: I,I

#### 1.4.Projeção dos nós em relação ao eixo global X

Devem ser listadas as coordenadas globais X de todos os nós. A numeração dos nós em cada pavimento obedecerá à mesma ordem desta listagem. Deve-se finalizar com um número negativo qualquer.

Formato: R

R

R

⋮

-R

#### 1.5. Número de tipos de andar

Dois andares são de um mesmo tipo se possuírem o mesmo número de nós e elementos, dispostos de forma idêntica e de mesmas características (geométricas e de materiais).

Formato: I

#### 1.6. Apontador dos tipos de andar

Listagem do tipo de cada andar, do inferior ao superior. Se todos os andares forem do mesmo tipo esta listagem deve ser omitida.

Formato: I,I,I.....I

#### 1.7. Número de nós do pavimento térreo

Entende-se como contidos no pavimento térreo os nós de menor coordenada global Y.

Formato: I

#### 1.8. Características dos nós do pavimento térreo

Para cada nó indicar:

-Número do nó (de acordo com o item 1.4);

-Restrições do nó em relação aos deslocamentos horizontais, verticais e rotações em torno do eixo Z (perpendicular ao plano da estrutura), sendo para tanto utilizados os seguintes códigos:

1 = movimento impedido;

0 = movimento liberado;

-Deslocamentos previamente aplicados.

Formato: I(,III,R,R,R)

#### 1.9.Características de cada tipo de andar

Para cada tipo de andar indicar:

-Pé-direito (diferença entre a coordenada Y dos nós do andar e a dos nós do andar imediatamente inferior);

-Número de nós (inclui somente os nós ao nível das vigas);

-Número de elementos.

Formato: R,I,I

#### 1.10.Características dos nós de cada tipo de andar

Para cada andar,ver item 1.8.

#### 1.11.Características dos elementos de cada tipo de andar

Para cada tipo de andar indicar, para cada elemento:

-Numeração dos elementos no andar (começar pelas vigas);

-Número dos nós inicial e final, de acordo com o item 1.4 (no caso de colunas o nó inicial deve ser sempre o do andar mais inferior);

-Número do tipo de características geométricas (de acordo com tabela a ser criada no item 1.13);

-Número do tipo de características do material (de acordo com tabela a ser criada no item 1.12);

-Código do tipo de elemento (0 para vigas e 1 para colunas);

-Dimensões dos nós finitos, se existirem (válido somente para vigas), nas extremidades inicial e final, respectivamente.

Formato: I,I,I,I,I(,R,R)

#### 1.12. Propriedades elásticas

Para cada tipo de material indicar:

-Número do tipo de material (em sequência);

-Módulo de elasticidade longitudinal;

-Módulo de elasticidade transversal;

-Coeficiente de dilatação térmica;

-Peso específico.

Formato: I,R,R,R,R

#### 1.13. Propriedades geométricas

Para cada tipo de característica geométrica indicar:

-Número do tipo de característica (em sequência);

-Área da seção transversal;

-Momento de inércia em torno do eixo global Z;

-Fator de forma para consideração do efeito cortante;



-Altura da seção transversal.

Formato: I,R,R,R,R

## 2.CARACTERÍSTICAS DOS CARREGAMENTOS

### 2.1.Número de casos de carregamento

Formato: I

2.2.Código de escoramento e quantidade de carga acidental a considerar como atuando durante a construção

0 = não considera escoramento

1 = considera escoramento

O escoramento é simulado pela aplicação, no andar imediatamente inferior, do carregamento do andar escorado. A retirada do escoramento, na análise subsequente, acarretará o alívio deste carregamento, representado por sua aplicação com o sinal invertido.

Formato: I,R

### 2.3.Características de cada caso de carregamento

#### 2.3.1.Título

Deve ocupar apenas uma linha (80 caracteres).

#### 2.3.2.Número de tipos de distribuição de cargas e tipo do carregamento

O número de tipos de distribuição de cargas define a quantidade de disposições distintas de cargas (duas distribuições de cargas em andares diferentes serão de mesmo tipo se forem aplicadas de maneira idêntica e em elementos e nós de mesma numeração local).

2.3.3.0 tipo do carregamento é definido por um dos seguintes códigos:

1=>carregamento a ser analisado do modo usual (todo o carregamento atuando de uma só vez na estrutura pronta). Ex:carga acidental devida à ocupação normal, vento, etc.

2=>carregamento incremental de peso próprio;

3=>carregamento térmico;

0=>carregamento incremental complementar (ocorre em paralelo ao de número 2, por ex: carregamento acidental de construção devido ao trânsito de operários e depósito de materiais na obra). A magnitude deste carregamento será expressa em função da carga acidental devida à ocupação normal, e deve ser definida no item 2.2.

<0=>carregamento incremental defasado (indica a defasagem entre a retirada do escoramento e a aplicação deste carregamento). Ex: alvenaria ou revestimento.

Formato: I,I

#### 2.3.4.Definição do tipo de andar

Se o número de tipos de distribuição de carga é igual a um, passar para o próximo item.Caso contrário definir, para cada andar, do inferior ao superior, o tipo de distribuição.

Formato: I,I,.....I

#### 2.3.5.Número de nós carregados no pavimento térreo

Formato: I

### 2.3.6.Cargas dos nós do pavimento térreo

Para cada nó carregado indicar seu número, cargas nas direções globais X e Y e momentos em torno do eixo global Z.

Formato: I,R,R,R

2.3.7.Para cada tipo de distribuição de carregamento, indicar:

2.3.7.1.Número de nós e número de elementos carregados.

Formato: I,I

2.3.7.2.Cargas nodais

Ver item 2.3.6.

2.3.7.3.Cargas nos elementos

Para cada elemento carregado indicar:

-Número do elemento;

-Carga uniformemente distribuída (sinal compatível com a orientação do eixo local y);

-Ponto inicial da carga (tendo como origem o nó inicial do elemento);

-Ponto final da carga (mesmo referencial do ponto inicial). Para carga concentrada:

pt.inicial = pt.final = pt.de aplicação;

Se a carga for de origem térmica:

-Número do elemento;

-Carga (se a temperatura varia de maneira uniforme ao longo do eixo, então  $carga = \Delta T$ ; se variar ao

longo da seção transversal,  $carga = \Delta T = T_s - T_i$ );

-Tipo de variação (uniforme=0; c.c.=1)

Formato: I,R,R,(R)

### 3.EXECUÇÃO DO PROGRAMA

Durante esta etapa devem ser feitas algumas opções de cálculo, impressão e combinação de resultados.

#### 3.1.Execução

É iniciada após digitar-se ACON, seguido da tecla <return>. Deverão então ser respondidos aos seguintes itens, via tela:

-Nome do arquivo de dados (previamente editado de acordo com as indicações anteriores);

-Nome do arquivo de saída;

-Impressão de deslocamentos (S/N)?;

-Impressão de reações (S/N)?;

-Impressão de esforços (S/N)?;

-Impressão de resultados intermediários (S/N)?;

(por resultados intermediários entende-se deslocamentos, reações e esforços obtidos nas etapas intermediárias de construção e carregamento);

-Cálculo de máximos e mínimos (S/N)?;

(máximos e mínimos significam a envoltória dos esforços apenas para o carregamento incremental, isto é, os esforços extremos a que foi submetido cada elemento durante as diversas fases da análise construtiva, bem como as fases

em que estes esforços ocorreram);

-Impressão de máximos e mínimos (S/N)?

(os esforços extremos podem opcionalmente ser calculados para efeito de combinação com os demais carregamentos, sem que sejam impressos separadamente. Neste caso a resposta para este quesito deve ser negativa. Esta opção somente aparecerá em tela se a opção anterior obtiver resposta afirmativa);

-Deseja saída gráfica (S/N)?

(A critério do usuário, e caso o mesmo tenha acesso ao sistema SALT, pode ser criado um arquivo que contenha as características geométricas da estrutura nos formatos especificados pela referência [ 21 ], permitindo então que a mesma seja plotada. Este procedimento visa facilitar a detecção de possíveis erros na definição dos dados de entrada do programa ACON);

-Nome do arquivo de saída gráfica (sem extensão):

### 3.2. Combinação de resultados:

Após a execução da análise surge no vídeo o menu com as opções de combinação.

->MENU PRINCIPAL:

OPÇÕES DE COMBINAÇÃO:

<1> CARREGAMENTO INCREMENTAL

<2> CASO DE CARREGAMENTO 1

<3> CASO DE CARREGAMENTO 2

<.> .

<.> .

. .

<n+1> CASO DE CARREGAMENTO N

<n+2> NOVA COMBINAÇÃO

<n+3> COMBINAR

<n+4> FIM

OPÇÃO: \_\_

Procedimento:

-Digitar o caso a combinar (de 1 a n+1);

-Digitar o fator de multiplicação do carregamento;

-Indicar se a combinação é de esforços, deslocamentos ou reações;

-Se a opção escolhida for a incremental e estiver sendo efetuada a combinação de esforços, deve-se fazer a opção por esforços finais, máximos ou mínimos;

-Para finalizar as combinações digita-se <n+3>. Pode então ser feita a opção da unidade de saída (impressora, vídeo ou arquivo; para o último caso entrar com o nome do

arquivo);

-Para iniciar nova combinação digita-se <n+2>. Caso contrário, finalizar com <n+4>.

#### 4.CÓDIGOS DE ERRO

erro 1: definição incorreta da carga atuante nos nós;

erro 2: número total de nós superou o dimensionamento  
(max = 250);

erro 3: número de casos de carregamento superou o  
dimensionamento (max = 5);

erro 4: definição incorreta da carga atuante nos  
elementos;

erro 6: número de elementos superou o dimensionamento  
(max = 300);

erro 10: número de tipos de material superou o  
dimensionamento (max = 5);

erro 11: número de tipos de seção superou o  
dimensionamento (max = 20);

erro 12: número de andares superou o dimensionamento

(max = 40);

erro 13: número de tipos de andar superou o dimensionamento (max = 5);

erro 14: número de nós com condição de contorno superou o dimensionamento (max = 70);

erro 15: número de nós com abcissas diferentes superou o dimensionamento (max = 20);



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) VASCONCELLOS FILHO, A., "EDIFÍCIOS DE ANDARES MÚLTIPLOS", UFMG, 1981
- (2) CHOI, C.K. e KIM, E.D., "MULTISTORY FRAMES UNDER SEQUENCIAL GRAVITY LOADS", Journal of Structural Engineering, ASCE, p.p. 2373-2384, novembro de 1985
- (3) SAFFARINI, H., "MULTISTORY FRAMES UNDER SEQUENCIAL GRAVITY LOADS - DISCUSSION", Journal of Structural Engineering, ASCE, p.p. 1628-1630, julho de 1987
- (4) FONTE, A.O.C., "EDIFÍCIOS DE ANDARES MÚLTIPLOS SOB CARGAS GRAVITACIONAIS SEQUENCIAIS", Seminário de Doutorado no Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 1988
- (5) SORIANO, H.L. e FONTE, A.O.C., "COMPUTAÇÃO DO EFEITO CONSTRUTIVO INCREMENTAL EM EDIFÍCIOS ALTOS ", Congresso Ibero-Americano sobre Métodos Computacionais em Engenharia, Portugal, MECON 89
- (6) SELVARAJ, S. e SHARMA, S.P., "INFLUENCE OF CONSTRUCTION SEQUENCE ON THE STRESSES IN TALL BUILDING FRAMES" Regional Conference on Tall Buildings, p.p.197-211, Bangkok, janeiro de 1974
- (7) SORIANO, H.L., "ANÁLISE DE ESTRUTURAS RETICULADAS EM COMPUTADORES DE PEQUENO PORTE", Escola de Engenharia, UFRJ, 1983

- (8) SORIANO, H.L. e PAULA, R.P., "GENERALIZAÇÃO DA TÉCNICA DO NÚMERO GRANDE NO MÉTODO DOS DESLOCAMENTOS ", Revista Escola de Minas, UFMG, pp.5-9, primeiro trimestre, 1985
- (9) SORIANO, H.L., "APROXIMAÇÕES EM ANÁLISE ESTRUTURAL", Escola de Engenharia, UFRJ.
- (10) COUNCIL ON TALL BUILDINGS, Committee 9, 1980, "GRAVITY LOADS AND TEMPERATURE EFFECTS", Chapter CL-1, Vol.CL of Monograph on Planning and Design of Tall Buildings, ASCE, New York
- (11) RUSSEL, H.G., "HIGH-RISE CONCRETE BUILDINGS:SHRINKAGE, CREEP AND TEMPERATURE EFFECTS", Analysis and Design of High-Rise Concrete Buildings, Jaime Moreno, ACI, 1985
- (12) SBAROUNIS, J.A., "MULTISTORY FLAT PLATE BUILDINGS", Concrete International-Design and Construction, vol.6-número 2, fevereiro de 1984
- (13) LIU, X., CHEN, W. e BOWMAN, M.D., "CONSTRUCTION LOAD ANALYSIS FOR CONCRETE STRUCTURES", Journal of Structural Engineering, ASCE, p.p. 1019-1036, maio de 1985
- (14) EL-SHEIKH, M. e CHEN, W., "MAXIMUM PROBABILISTIC SHORE LOAD IN MULTISTOREY R/C BUILDINGS", Computers and Structures, p.p. 1347-1357, 1989
- (15) CÂMARA Jr., V.F., "ANÁLISE DOS ESFORÇOS EM EDIFÍCIOS ALTOS", Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, 1978
- (16) "CARGAS PARA O CÁLCULO DE ESTRUTURAS DE EDIFICAÇÕES - NBR 6120", ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1980

- (17) "FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES - NBR 6123",  
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas,  
1980
- (18) "FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES - PROJETO DE  
REVISÃO", ABNT - Associação Brasileira de Normas  
Técnicas, 1986
- (19) WEAVER Jr., W., "COMPUTER PROGRAMS FOR STRUCTURAL  
ANALYSIS", Van Nostrand, 1967
- (20) WEAVER Jr., W. e GERE, J.M., "MATRIX ANALYSIS OF  
FRAMED STRUCTURES", Van Nostrand, 1980
- (21) LIMA, S.S.L. e SORIANO, H.L., "SALT-PROGRAMA PARA  
ANÁLISE LINEAR DE ESTRUTURAS: MANUAL  
DE UTILIZAÇÃO", divulgação interna da Escola de  
Engenharia, UFRJ
- (22) MELO NETO, R.C., "CONTRIBUIÇÃO À CLASSIFICAÇÃO DE  
SISTEMAS DE CONTRAVENTAMENTO E MÉTODOS DE ANÁLISE  
EM EDIFÍCIOS DE ANDARES MÚLTIPLOS EM AÇO", Tese  
de Mestrado, COPPE/UFRJ, 1987